修士論文

高角度分解能を目指した 多重薄板型X線望遠鏡の開発とその性能評価

首都大学東京 理学研究科 物理学専攻 修士課程 宇宙物理実験研究室

指導教官 大橋 隆哉

窪田 廉

2007年1月10日

X線望遠鏡の持つ高い角度分解能と集光力は、X線天文学に飛躍的な発展をもたらした。高い角度分解能は、観測天体の位置・空間構造を把握することを可能にし、集光力は、検出器の小型化とともに S/N 比の向上を可能にした。

X 線はほとんどの物質に対し屈折率が1よりもわずかに小さいため、反射させるためには非常に小さな角度で 反射鏡に入射させる必要がある。そのため、X 線望遠鏡には、回転放物面鏡と回転双曲面鏡を組み合わせた Wolter I型斜入射光学系が採用されている。しかし、反射鏡を見込む面積が非常に小さいために、集光される X 線は非常 に少ない。そのため、反射鏡を同心円状に多重に積層した「多重薄板型」X 線望遠鏡を用いてより多くの X 線を 集光できるようになった。

2005年7月に打ち上げられたX線天文衛星「すざく(Suzaku)」には、厚さ180µmの反射鏡を同心円状に175枚 積層した「多重薄板型」X線望遠鏡が搭載されている。すざくの望遠鏡は焦点面においてHPD(Harf Power Diameter) で1.8分角の像の広がりをもつ。この像の広がりの要因は、製作を容易に行うため反射鏡を円錐面に近似したこと と、反射鏡鏡面のうねりによる反射鏡鏡面の形状誤差、反射鏡が設計の位置からずれることによる反射鏡の位置 決め誤差の3つが挙げられる。すざく衛星搭載のX線望遠鏡では、全体の結像性能1.8分角は、円錐近似による 誤差0.3分角、形状誤差0.85分角、位置決め誤差1.5分角に分解でき、結像性能の最も大きな要因となっている のは、位置決め誤差であることが分かった。

すざく衛星に搭載されている X 線望遠鏡では、「アライメントバー」という4本の櫛の歯状のバーを用いて反射 鏡を上下で支持している。X 線が反射鏡に当たり結像する位置は、反射鏡上下段のなす角で決定される。そのた め、上下段反射鏡を支持している4本のアライメントバーが別々に動くことにより、結像位置を一点にそろえる ことが非常に困難になっている。また、組み上げの工程で反射鏡をアライメントバーの櫛の歯部分に挿入するた め、反射鏡と溝との間に50µmの「遊び」が設けられている。この遊びにより反射鏡個々が傾きを変えてしまい、 反射鏡上下段のなす角が変化し結像位置がばらつきを持ってしまっている。

これまで、位置決め誤差を改善するため、アライメントバーを4段一体型にし、反射鏡のなす角が加工精度でのみ決まるような新たな反射鏡支持機構「アライメントプレート」を導入した。また、溝の遊びを15µmにまで減らすことで、反射鏡個々のばらつきを押さえることに成功した。しかし、溝の遊びを詰めることにより、望遠鏡内でのプレート同士のわずかなずれから、反射鏡の挿入が困難になり、また反射鏡にストレスを与えることにより、形状を歪めてしまうことがわかった(2006年大熊修論)。

今回、私は形状を歪めずに位置決めの精度を向上させるため、新しいアライメントプレートを開発し、その調整手法を研究した。新しいアライメントプレートでは、これまで厚さ1.5mm であったアライメントプレートを、 厚さ1.0mmの基準となるプレートと、厚さ0.5mmの補助となるプレートに分け、反射鏡挿入後に補助となる厚 さ0.5mmのプレートを押し込むことによって挿入時に広かった溝の遊びを後から詰めることを可能にした。同時 に、これまで精度良く加工された内壁につき当てることで位置決めしていたアライメントプレートをマイクロメー ターにより微調整ができるようにした。マイクロメーターによる微調整が可能になったことで、反射鏡挿入後で もアライメントプレートの調整が可能になった。また、並行して進めてきた反射鏡製作技術の向上により、今回初 めて自分達で製作した反射鏡を用いることができるようになった。

このアライメントプレートを導入した望遠鏡に、自作した反射鏡を10組挿入し、補助のプレートで溝の遊び (35µm)を調整により詰めた前後で、位置決めによる結像性能がどのように変化するかを調べた。その結果、望遠 鏡全体の結像性能は、調整前で1.75分角、調整後で1.47分角となることがわかった。また、結像性能の決定要因 を調べたところ、位置決め誤差については調整前が1.24分角、調整後は0.90分角となり、すざくの1.5分角に比 べかなり向上していると言える。形状誤差は調整前は1.18分角であったのに対して調整後は1.26分角となり、も くろみ通り形状を歪めずに位置決めを向上させることができた。

本論文では、新たに製作したアライメントプレートの説明と、その具体的な調整手法、および実験結果について述べる。また、さらに結像性能を向上させる手法についても検討する。

目 次

第1章	序論	1
1.1	X 線天文学	1
1.2	結像性能と X 線天文学	1
第2章	X線望遠鏡	4
2.1	X 線望遠鏡に用いられる光学系—斜入射光学系	4
2.2	X 線望遠鏡の種類	4
	2.2.1 多重薄板型	4
	2.2.2 直接研磨型	5
2.3	X 線望遠鏡の性能	7
	2.3.1 集光力 (有効面積)	7
	2.3.2 結像性能 (HPD、PSF、EEF)	8
第3章	多重薄板型 X 線望遠鏡の結像性能の決定要因	0
3.1	結像性能の決定要因・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	.0
	3.1.1 反射鏡の円錐近似	.0
	3.1.2 反射鏡鏡面の形状誤差	.2
	3.1.3 位置決め誤差	.3
3.2	すざく衛星搭載の X 線望遠鏡	.5
	3.2.1 構造	.5
	3.2.2 反射鏡の製作方法	.7
	3.2.3 反射鏡の支持機構1	.7
	3.2.4 結像性能	8
	3.2.5 位置決め誤差の要因 1	.8
第4章	レプリカ法による反射鏡の製作 2	21
4.1	レプリカ法	21
4.2	反射鏡製作の手順	22
	4.2.1 基板の製作	22
	4.2.2 反射膜の成膜	24
	4.2.3 基板と反射膜の接着	27
	4.2.4 基板の剥離 2	28
4.3	反射鏡の形状評価	29
	4.3.1 反射鏡形状の測定	29
	4.3.2 形状の評価	29

第5章	新しい反射鏡支持機構とその調整					
5.1	新しいアライメントプレートの開発....................................	32				
	5.1.1 アライメントプレートの導入とこれまでの経緯	32				
	5.1.2 アライメントプレートの改良	33				
5.2	アライメントプレートの形状評価	36				
	5.2.1 溝位置の測定	36				
	5.2.2 なす角のずれ	40				
5.3	アライメントプレートの調整....................................	44				
	5.3.1 ハウジングの改良・調整治具の製作	44				
	5.3.2 アライメントプレートの調整	47				
	5.3.3 調整後の位置決め精度	54				
笛く音	V頃にトス頃清徳の光ヴ測字	60				
第1 日早	▲ 緑による主風硯の儿子側足 ら 計 倍の 取 出	60				
6.2	又別現の形仏 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	62				
0.2		65				
	0.2.1 /凤疋和禾	65				
6.2	0.2.2 馬品起離	67				
0.5	品像性能の決定委囚の切り方() · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	09 71				
0.4		71				
	0.4.1 /测定力///////////////////////////////////	71				
6.5	0.4.2 測止結果	12				
6.5		11				
	0.3.1 測定力法	11				
	0.3.2 測定結果	//				
		81				
	6.5.4 1組のイメーシの結像位直のはらつさ	86				
6.6		90				
	6.6.1 円錐近似と形状誤差の分離	90				
	6.6.2 位直 次の誤差の分離	90				
6.7	結果のまとのと考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	91				
第7章	まとめと今後の展望	93				
7.1	まとめ	93				
7.2	今後の展望・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	93				
付盘人	宝融法署	05				
	天歌衣直 非接触 3 次元形状測定装置 (NH 5N NH3 NS)	95				
A.1	4.11 工业ジ検出測定	97				
A 2	A.I.I エリン (K山)) と · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	08				
A.2	Δ marxin レンフノム・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20 00				
		77 100				
	A.2.2 [1]型Aフラフェー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	100				
	A.2.5 八×モノエノハー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	100				
	<u> </u>	103				
	A.4.5 异工农旦····································	104				
	A.2.0	100				

109

第1章 序論

1.1 X 線天文学

自分達の住む宇宙の果てがどうなっているのか、また、その形成はどのように為されたのか。これら を追い求め、理解することが天文学の目的である。そのためには天体の物理状態を知ることが必要不可 欠である。

天体が放つ光即ち電磁波は天体からの多くの情報を持っており、これを観測することで我々は遠方の 天体の物理状態を知ることができる。この電磁波は波長によって電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、 ガンマ線に分類することができ、X線領域を観測し、X線放射の起源やそのダイナミクスについて研究 するのがX線天文学である。では、X線の波長域(0.1~100 keV)の天体からの電磁波を観測すること はどのような物理を解明していくことに継るのであろうか。

X線の一つの特徴はエネルギーが高いことである。例えば、可視光と比べるとそのエネルギーは3桁 も高い。これ程の高エネルギーは、1千万度~1億度の高温プラズマ領域や中性子星やブラックホール 近傍の強い重力場、超新星爆発などの強い衝撃波による電子の加速など、物質の極限状態で生み出され る。また、X線はもう一つの特徴として透過率が大きく、これにより、可視光領域では観測できない暗 黒星雲や厚いガス雲の中に隠された天体を観測することが可能である。

しかし、X線は大気に吸収されてしまうため観測機器を飛翔体に搭載し大気圏外に出て観測する必要 がある。このことがX線天文学を阻み、1962年のジャッコーニとロッシによるサウンディングロケット を用いた観測が行なわれるまで、太陽起源以外のX線を観測することはできなかった。しかしそれ以後 の気球実験、さらには1970年の「Uhuru」衛星以降は数々のX線天文衛星が打ち上げられ、観測が行な われてきた。その結果現在の観測対象は恒星のコロナから、白色わい星、中性子星、ブラックホール候 補天体、活動銀河核などの高密度天体、また超新星残骸、銀河団などの高温プラズマ天体などの多岐に わたる。

さらに、近年では地上の加速器では再現できない高エネルギーを生み出す、X線放射領域は、高エネ ルギー物理の検証の場として用いられるようになってきている。

1.2 結像性能とX線天文学

天体が放つ X 線の強度は最も明るい X 線天体の1つである蟹星雲からでさえ、1 [photon/cm²/s] しか なく、地上の実験室での X 線強度から数桁から十数桁微弱なものである。観測される典型的なフォトン のカウントレートは1 [counts/s] 程度であり、このため1つ1つのフォトンについて、その入射時刻、進 行方向、エネルギー等の詳細な情報を測定する。このため1部例外はあるが、X 線天文衛星には(X 線 望遠鏡またはコリメーター) + (エネルギー、時間分解能を持つ検出器)という組み合わせで観測機器 が搭載されてきた。

1962年以降、数々のX線天文衛星が打ち上げられ、X線天文学は衛星の技術的進化と共に発展してきた。 1970年代前半はコリメータ+ガス比例計数管といった組合せで、主な衛星として、「Uhuru」「Ariel-5」 「OSO-8」「HEAO-1」がある。この世代の天文衛星は広い有効面積の観測器による検出限界の向上を 図り、典型的な感度は1 mClab 程度であった。その中でも、すだれコリメータを搭載した「SAS3」は、 その位置分解能により、銀河系内にあるX線源の位置を正確に決め、光学天体との同定を行なった。

しかし、1978年に打ち上げられた「Einstein」衛星によって X 線天文学は劇的な進化を遂げることに なる。これまでのコリメーター + 検出器という組合せでは、検出器の開口面積を大きくすれば目的の天 体からのフォトンを開口面積に比例して多く集めることができるが、それと同時にバックグラウンドと なる、宇宙 X 線背景放射 (CXB)も同じように増える。さらには、もう1つのバックグラウンドである 荷電粒子等の宇宙線は、検出器の体積に比例して増えるため、検出器を大きくしても検出感度には限界 があった。これに対して、「Einstein」衛星は、X 線望遠鏡 + マイクロチャンネルプレートという組合せ を初めて搭載し、この限界を打ち破ることに成功した。X 線望遠鏡による角分解能を得ることで目的の 天体以外の方向からの X 線を除去でき、さらには小さな開口面積を持った検出器で多くのフォトンを集 めることができるため検出感度 (シグナルノイズ比:S/N比)が激的に改善され、検出感度 0.1 μClab を 達成したのである。

さらにその後、X線望遠鏡は持たないが特徴的な検出器を持つ衛星として、日本の打ち上げた、9.5%@6keV というこれまでの比例計数管の倍のエネルギー分解能を持つ、蛍光比例計数管を搭載した「てんま」、低 いノイズを持つ 4000*cm*² という大面積の比例計数管を搭載した「ぎんが」などがある。

X線望遠鏡を搭載した衛星として登場したのが、3秒角という高い角分解能を持った「ROSAT」である。この衛星は望遠鏡を搭載した衛星で初めて全天観測を行ない「Uhuru」衛星で観測したX線天体の200倍以上の10万個もの天体を発見することに成功した。さらに、90時間という長い周期の軌道を持つため、長時間の観測が可能だった「EXOSAT」がある。

また、撮像型蛍光比例計数管と共に、2%@6keV という半導体検出器としては限界に近いエネルギー 分解能を持つX線CCDを初めて焦点面に搭載し、0.1~10 keVのX線領域で世界初の撮像分光観測を可 能にした「あすか」がある。この衛星の登場によって、銀河系中心付近からの蛍光鉄輝線の発見や超新 星残骸や銀河団の重元素組成の測定に基づく、宇宙の化学進化の研究などの天文学上の成果が得られた。

さらに「XMM」「Chandra」などといった最新のX線天文衛星では、(秒角単位の角分解能を持つX線 望遠鏡)+(X線CCDとGrating等の分散型高分解能分光素子)という組合せになってきている。これ により、離角が秒角程度の重力レンズによるクローバーリーフの発見、Jetの加速機構の解明などX線天 文学上重要な発見が為されている。

一方、先日打ち上げられた「すざく」衛星はこれらとは異なり、高い集光力と優れたエネルギー分解 能を持たせるという方向性をとっている。

以上のように、X線天文学はX線天文衛星の技術的進化、特にX線望遠鏡の進化によって大きく発展 してきた。3章で述べるように、X線望遠鏡は製作方法によって性能に大きく制限がつき、広いエネル ギー帯域で高い集光力を持ち、それと同時に高い分解能を持つことは現段階では不可能である。しかし、 これを打破することができれば、X線天文学にさらなる発展が望める。そこで、本研究では高い集光力 を保ちつつも、結像性能を秒角単位まで向上させるための基礎開発を行なう。

図 1.1 に検出感度、角分解能、エネルギー分解能の進化を示す。

2



図 1.1: X 線天文衛星の性能の変遷 (左上:空間分解能、右上:エネルギー分解能、下:検出感度)

第2章 X線望遠鏡

2.1 X線望遠鏡に用いられる光学系 - 斜入射光学系

可視光で像をつくるには、レンズを利用した屈折光学系を用いるのが普通である。しかし、2.3 で述べ たように X 線領域では、ほとんどの物質の屈折率が1 に極めて近く、X 線をほとんど屈折しないため、 鏡を用いた反射光学系を用いる。しかし、X 線の直入射の反射率は非常に小さいので、X 線を臨界角以 下(~1°以下)の小さい角度で全反射させて集光する、斜入射光学系を用いる。斜入射光学系の例(Wolter I型)を、図 2.1 に示す。図 2.1 に示すように、Wolter I 型斜入射光学系では、回転放物面と回転双曲面の 内面で入射 X 線を 2 回反射させ、焦点に集光させる。これにより、焦点距離(二つの曲面の接合部から 焦点までの距離)を短くすることができる。



図 2.1: (左):回転放物面反射鏡、(右):Wolter I 型反射鏡

2.2 X線望遠鏡の種類

斜入射光学系では、X線入射方向から見た鏡の見込む面積は小さくなり、鏡の実面積の 1/100 以下に なる。そのため、集光力を増すには、鏡は1枚ではなく、図 2.2 に示すように、多数の鏡を同心円上に 配置することが必要になる。

2.2.1 「多重薄板型」

集光力をできるだけ大きくするため考案された望遠鏡として、「多重薄板型」X線望遠鏡がある。これは、基板の厚さを~0.2mmと極力薄くし、非常に多数(~200枚)の反射鏡を同心円状に並べたもので、 軽量でありながら高い開口効率を実現する。鏡面基板は直接研磨せず、アルミニウム薄板に金のレプリ カをとる方法(レプリカ法:4章参照)によって、平滑な鏡面を実現している。ただし、反射鏡は2次曲面 ではなく、円錐面に近似して製作している。我が国では、あすか衛星をはじめ、Astro-E、すざく衛星と、 このタイプの望遠鏡の開発を進めてきた。



図 2.2: X 線望遠鏡の断面図— (複数の反射鏡を同心円共焦点配置に組み込んだ、斜入射型 (Wolter-I)X 線望遠鏡の断面図)

2.2.2 「直接研磨型」

一方、望遠鏡の結像性能を重視した「直接研磨型」X線望遠鏡がある。これは、鏡面を直接切削、研磨し、正確な非球面(放物面又は双曲面)加工を行う。具体的には、ゼロデュアーガラス¹を、小型工具を 走査させ部分的に工具の滞留時間をコンピュータ制御することで、非球面形状に加工する。さらにその 表面に金などを蒸着し、反射率を稼ぐ。

この方法で製作された反射鏡は、鏡面を正確な理想2次曲面に加工することができるため、非常に高 い結像性能を実現することができる。実際に「直接研磨型」X線望遠鏡を搭載した *Chandra* では結像性 能0.5秒角を達成している。しかし、加工のため、基板として用いるガラスの厚さを数 cm 程度必要と するため開口効率は非常に悪く、またその重量は非常に大きくなる。「*Chandra*」ではX線望遠鏡だけで 1.5トンもの重さになる。

¹熱膨張率が非常に小さく、宇宙空間のような苛酷な状況下でも安定して高分解能の結像性能を保つことができる。



Outer Bottom Ring

図 2.3: 「多重薄板型」X 線望遠鏡— 写真は Astro-E の XRT である。~180 µm という薄さの反射鏡 (基板:アルミニウム)が 0.5~1.2 mm 間隔で 175 枚も並べられている。1 台 20 kg という軽さで大有効面積を実現する。



図 2.4: 「 直接研磨型 」 X 線望遠鏡 — 写真は *Chandra* の XRT である。数 cm の厚さの反射鏡 (基板: ガラス) が 4 枚並 べられている。鏡面を直接研磨しているため、結像性能が非常に良い。しかし、重さは1台で1トンもある。

2.3 X線望遠鏡の性能

望遠鏡の性能は、大きく、集光力と結像性能によって表される。ここでは、この2つの性能を評価す るために必要な物理量を定義する。

2.3.1 集光力(有効面積)

 10^{4}

X線望遠鏡の集光力は、光軸方向から見た反射面の面積(開口面積)に、反射率を掛けた有効面積と呼ばれる量で表す。有効面積 *S_{eff}* は次の式で定義される。

$$S_{eff}(E) = \int S(\theta) R^2(\theta, E)$$
(2.1)

ここで、 $S(\theta)$ は一段目の反射鏡に入射角が $\theta \sim \theta + d\theta$ の間にある開口面積で、 $R(\theta, E)$ は入射角 θ , エネルギー E の時の鏡面の反射率である。反射は一段目と二段目で、それぞれ入射角 θ の2回反射となるため、 $R^2(\theta, E)$ となっている。

ここで、有効面積を増大させるためには、光学望遠鏡の様に、焦点距離を一定にして口径を大きくし ただけでは、外側ほど反射鏡への入射角が大きくなるので、反射率が落ち実質的な光量の増加は望めな い。つまり、焦点距離を一定にした場合、臨界角を越えるほど口径を大きくすれば、それ以上口径を大 きくしても有効面積が増えることはない。そこで、望遠鏡の口径とともに重要となるのが、口径内に占 める反射面の割合(開口効率)である。開口効率を上げるためには、鏡面基板の厚さをできるだけ薄く し積層枚数を上げればよい。最後に、様々な衛星の有効面積の比較を図 2.5 に示す。

ХММ

Effective areas of various missions



図 2.5: 様々な衛星に搭載される X 線望遠鏡の有効面積 (XRT-S は望遠鏡1台の有効面積、その他は mission 全体の有効面積 である。) – AE は Astro-E の略である。

2.3.2 結像性能(HPD、PSF、EEF)

結像性能の評価には、以下のような3つの物理量が用いられる。

1. HPD (Half Power Diameter) - 全光量の 50% が含まれる円の直径

平行な X 線が X 線望遠鏡に入射し、焦点面上に作るイメージの例を図 2.6 に示す。理想的には、イメージは 1 点に結像するが、実際には、図 2.6 のように、広がりを持ったイメージとなり、この広がりの大き さで結像性能 (角分解能)が決まる。この広がりの大きさを表すのに、HPD(Half Power Diameter)が用いられる。これは、全光量の 50% が含まれる円の直径である²。HPD の値が小さいほど、結像性能が良い。



図 2.6: 焦点面のイメージ。等高線で表したもの(左)と、3次元的に表したもの(右)。

2. PSF (Point Spread Function) — 半径 r の円周上に含まれる単位面積当りの光量

焦点面に作られる2次元のイメージ上で、半径rの円周上に含まれる単位面積当りの光量をPSFと呼ぶ(図2.7)。これは、無限遠にある点源から放射されたX線が、XRTの焦点面に作る輝度分布であり、 PSFのコアの部分が鋭いピークを持つほど、結像性能が良いといえる。

²一般に、分解能を表すのに FWHM(Full Width at Half Maximum) が使われる。しかし、斜入射光学系の XRT の輝度分布は 中心部に鋭いピークを持ち、中心付近の強度分布については ガウス分布/半径 の関数型で表すことができる。すると、半径が 小さくなると、ピークの輝度は 1/r で高くなる。これは位置分解能がより良い焦点面検出器を使えば、検出器の 1 画素あたり の面積とともに r がさらに小さくなるので、ピークの高さはより高くなることになる。つまり使用する検出器の位置分解能に よって、FWHM の値が異なってしまう。これでは斜入射光学系の結像性能を評価することはできない。一方、HPD は全光量 の 50% を含む円の直径であり、全光量にのみ依存した値なので、検出器の位置分解能に依存しない。このため、斜入射光学系 の望遠鏡を評価するには HPD が適している。



図 2.7: Point Spread Function (1 次元)。 焦点面のイメージを動径方向に積分し (左),1 次元の PSF を作る (右)。

2. EEF (Encircled Energy Function) — 半径 r の円内に含まれる光量

結像中心から半径 r の円内に含まれる光量を、EEF と呼ぶ。EEF は以下の関係式に示したように PSF の積分形となっている。

$$EEF(r) = \int_0^r 2\pi r PSF(r) dr$$
(2.2)

EEF のプロットにおいて、縦軸が 50% の時の横軸の値 (半径)を2倍した値が HPD に相当する。最後 に、PSF、EEF、HPD の関係について図 2.8 にまとめる。図 2.8 は、入射した X 線の全光量を1と規格 化した時の EEF、r=0 の時1になるようにした PSF のr 依存性を表している。PSF のピークが鋭いもの、 EEF の立ち上がりが鋭いものが結像性能が良いといえるが、これを定量的に表すために HPD を用いて いる。図 2.8 の場合では、EEF が 0.97 分角の時に全光量の 50% になっているので、HPD はその 2 倍の 1.94 分角となる。



図 2.8: PSF、EEF、HPDの関係

第3章 多重薄板型X線望遠鏡の結像性能の決定要因

2 で述べたように多重薄板型 X 線望遠鏡は、非常に薄い反射鏡を同心円状に何重にも積層させ、小型で 軽量かつ大きな有効面積を実現できるように工夫された X 線望遠鏡である。しかし、反射鏡が「多重」 で「薄板」であるために、結像性能は直接研磨型の X 線望遠鏡には遥かに及ばない。ここでは、その原 因となっている「多重薄板型」X 線望遠鏡の結像性能を決定する要因について説明し、先日打ち上げら れたすざく衛星に搭載されている X 線望遠鏡の結像性能と結像性能向上の可能性について示す。

3.1 結像性能の決定要因

多重薄板型 X 線望遠鏡の結像性能は大きく分類して次の3種類の独立要因から決定される。

3.1.1 反射鏡の円錐近似

X線望遠鏡に採用される Wolter I型光学系は回転双曲面鏡と回転放物面鏡を用いた2回反射で焦点面 にX線が集光される。しかし、回転双曲面鏡と回転放物面鏡は非常に製作が困難である。そのため、製 作の容易さの点から2次曲面を円錐で近似した反射鏡を用いている。この場合2回反射した像は1点に 集光せず、必ず広がりを持ってしまう。(図 3.1) この広がり HPD_{円錐近似}を見積もってみると、

$$HPD_{$$
円錐近似 = $\tan^{-1}\left(\frac{L\tan\theta/\cos4\theta}{F}\right) = 0.3$ [分角]

θ:入射 X 線と反射鏡のなす角度 ~ 0.25°
 L:光軸方向への反射鏡の長さ = 100mm
 F:焦点距離 = 4750mm

となることが分かる。ここで、代入した値は、すざく衛星搭載のものである。つまり、すざく搭載の 望遠鏡の設計ではこの0.3分角が結像性能の原理的な限界となっている。円錐近似による像の広がりは、 円錐型に近似した反射鏡を用いる限りは残ってしまう要因ではあるが、現在の結像性能決定要因に占め る割合は最も小さいく、結像性能劣化の大きな原因とはなっていない。しかし、今後結像性能を秒角の レベルまで向上させようと思うと、改善する必要がでてくるのは必至である。



図 3.1: 反射鏡を円錐で近似していることによる像の広がり

3.1.2 反射鏡鏡面の形状誤差

多重薄板型 X 線望遠鏡は、非常に反射鏡が薄い。そのため、反射鏡鏡面に数 mm のスケールの大きな うねりを生じてしまい、入射 X 線が様々な方向に反射され、焦点面での像が広がってしまう¹。この像の 広がりの要因を、反射鏡鏡面の「形状誤差」と呼ぶ。

ここで、この要因による焦点面での像の広がり HPD_{形状誤差} を見積もってみる。HPD_{形状誤差} は、図 3.2 に示すように鏡面のうねりを反射鏡各点の法線ベクトルの揺らぎを用いて求めることができる。まず、 法線ベクトルは反射鏡の法線ベクトルの平均の向きのまわりに、ある分布を持ってばらつくとする。今、 この分布が幅 σ_{χ} のガウス分布であると仮定すると、平均的な反射鏡の傾きに対して入射角 θ で入射 した X 線は、反射鏡各点に対し、入射角に幅 σ_{χ} のばらつきを生じる。つまり、入射した X 線は鏡面 で入射方向に対して 2 θ の方向に反射されるため、反射鏡に入射した X 線が反射されるとき、射出角度 にばらつき 2 σ_{χ} を持つことになる。

X 線望遠鏡では、2 回反射し焦点面に結像するため、2 段目の反射を行なった後の射出方向のばらつ きは $\sqrt{(2\sigma_{kk})^2 \times 2} = 2\sqrt{2}\sigma_{kk}$ と書くとこができる。このことは、2 回反射後の像のプロファイルが $\sigma = 2\sqrt{2}\sigma_{kk}$ のガウス分布に従うことを意味している。ガウス分布では、 $-\sigma \sim \sigma$ の間には全積分量の 68%が含まれるため、これを全積分量の 50%が入る幅の HPD_{形状程差} は、

HPD_{形状误差} =
$$2 \times 0.68 \times 2\sqrt{2}\sigma_{3,44}$$

となる。ここで factor の 2 は、 $-\sigma \sim \sigma$ の範囲の幅を求めるため、0.67 は 68%を 50%にするために掛けている。この HPD_{形状記美} が、鏡面形状による反射光の広がりを表している。



図 3.2: (左) 反射鏡の形状による像の広がり(右) 反射鏡の各点での法線ベクトルの揺らぎ-反射鏡の反射光の広がりは、反射鏡各点での法線ベクトルのばらつき具合で表すことができる。

¹実際には 0.1~1 mm 以下のスケールにも数十 Å のうねりが生じると、X 線は反射鏡鏡面で散乱され像が広が広がってしまうが、現在その程度のうねりは反射鏡鏡面の成膜技術の向上のため、生じていないので議論しない。

3.1.3 位置決め誤差

多重薄板型 X 線望遠鏡は非常に多くの反射鏡を同心円状に積層しているため、全ての反射鏡を設計値 通りの位置に配置することが非常に困難である。反射鏡が設計値通りの位置に配置されていないと、反 射鏡個々に反射される X 線の結像位置が焦点面でばらつき、結果として全体の像が広がってしまう。(図 3.3)

反射鏡の位置決めはの上下段の各 2 点、計 4 点で行なっている。仮にその 4 点のうち 1 点が設計値から距離 d だけずれ、そのために X 線の入射角が $\Delta \theta$ 変化したとすると、X 線の出射方向は 2 回反射のために 2 $\Delta \theta$ 変化する。そのときの X 線の出射方向を反射鏡の母線方向の長さ l と移動距離 d を用いて表すと、

$$\Delta \theta = \tan^{-1} \left(\frac{d}{l \cos \theta} \right)$$

d:反射鏡の設計値からのずれ量 l:反射鏡の母線方向の長さ θ:設計値での X 線の入射角度

と表すことができる。(図 3.4) 仮に 1 点が設計値から 100µm ずれていたとすると、焦点面でのずれ量 は約 6.8 分角となり大きくずれてしまう。



図 3.3: 反射鏡の位置決めによる像の広がり一焦点面どの位置に結像するかは、反射鏡のなす角でのみ決定する。



図 3.4: 位置決めのずれによる反射光のずれ

3.2 すざく衛星搭載のX線望遠鏡

3.2.1 構造

すざく衛星には全部で5台の多重薄板型X線望遠鏡が搭載されており、その構造は、3.5に示すよう にQuadrantと呼ばれる1/4円筒を4つ組み合わせてできている。さらにQuadrantはの上下2段に分か れたハウジングの中に形状を円錐に近似した厚さ180µmの反射鏡が同心円状に175枚積層されている。 また3.8に示すように反射鏡の上段をPrimary、下段をSecondaryと呼んでいる。



図 3.5: X 線望遠鏡の構造—4 つの Quadrant と呼ばれる扇形のハウジングを組み合わせてできている。



図 3.6: Quadrantの構造—Quadrantはアラインメントバーに挟まれた14のセクターで構成されている。

3.6 は X 線望遠鏡の Quadrant を X 線の入射方向から見た図である。図に示す通り Quadrant は 14 のセ クターのよばれるアラインメントバーに挟まれる領域からできている。しかし、14 セクターのうち両端 1 セクター分は解放端となっており、結像性能が極端に悪いため、カバーをして観測には使用しない。詳 細な望遠鏡の仕様については 3.1 にまとめる。

表 3.1: すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の設計パラメータ

	XRT-I	XRT-S	XRT-S(spare)	
焦点距離	4750 [mm]	4500 [mm]	4500 [mm]	
焦点面検出器	XIS ^a	XRS ^b	XRS	
望遠鏡台数	4	1		
plate scale	0.725 分角 /1 mm	0.763 分角 /1 mm	0.763 分角 /1 mm	
反射鏡積層数	175	168	168	
X 線入射角度	0.178~0.599 度	0.188~0.639度	0.188~0.639度	
反射鏡の間隔	$0.488 \sim 1.239 \ [\text{mm}]$	$0.506 \sim 1.302 \; [mm]$	$0.506\sim 1.302~[mm]$	
開口面積(1台あたり)	$702 \ [cm^2]$	713 [cm ²]	$713 \ [cm^2]$	
有効面積 ^c 1.49 keV	566 [cm ²]	$569 [cm^2]$	583 [cm ²]	
4.51 keV	$420 \ [cm^2]$	$439 [\mathrm{cm}^2]$	$411 \ [cm^2]$	
8.04 keV	340 [cm ²]	$344 [\mathrm{cm}^2]$	$300 [\rm cm^2]$	
9.44 keV	$244 \ [cm^2]$	$246 [\mathrm{cm}^2]$	$214 \ [cm^2]$	
有効観測エネルギー領域	$\leq 10 \; [\text{keV}]$			
角度分解能 (HPD)	~ 2.1 [分角]			
口径	直径 400 [mm]			
反射鏡のサイズ	長さ 100×厚さ約 170 [µm]			
反射鏡の構造	アルミ基板 (厚さ 157.48 [μm])			
	+型取り用エポキシ (厚さ 12.7[µm])			
	+金(厚さ0.1 [µm])			
全重量 (1 台あたり)	~ 18 [kg]			

^a X線 CCD カメラ。位置情報とスペクトルが同時に得られる汎用性の高い検出器で、半導体検出器としては限 界に近いエネルギー分解能 130eV@6keV を実現。

^b X 線マイクロカロリメータ。入射する X 線光子のエネルギーを温度上昇として検出する検出器で、非常に優れたエネルギー分解能 (~12eV@6keV)を実現。

° 表面が理想的な反射鏡が設計値にあると仮定したときの計算値。

3.2.2 反射鏡の製作方法

反射鏡はレプリカ法という方法を用いて製作された。このレプリカ法とは、表面形状の非常に良いガ ラス母型に反射鏡の鏡面物質である金を蒸着し、薄い基板にエポキシ樹脂などの接着剤を噴霧したもの を母型に接着して、その基板を母型から剥がしとることで、ガラス母型を反射鏡の鏡面形状として写し 取る方法である。詳しいその作業工程は4章に示す。



図 3.7: レプリカ法で製作された反射鏡-厚さは 180µm、母線方向の長さは 101.6mm。

3.2.3 反射鏡の支持機構

Primary、Secondaryの反射鏡を設計値の場所で支持するには、少なくとも4点で支持する必要がある。 すざく搭載 X 線望遠鏡ではアラインメントバーという櫛の歯状のバー4本を用いて175枚の反射鏡の上 下端の支持を行なっている。また、アラインメントバーの溝の幅は220µmとなっており、反射鏡を望遠 鏡に挿入した後には、反射鏡を溝との間に50µmの隙間が生じる。



図 3.8: すざく搭載 X 線望遠鏡の反射鏡支持機構—4 段に分かれており、それぞれが反射鏡の Primary top、Primary bottom、Secondary top、Secondary bottom の 4 点の位置を決定している。

3.2.4 結像性能

すざく衛星搭載のX線望遠鏡の結像性能を3.1の3つの要因で分離する。それぞれの誤差要因は独立 事象なので、全体としての結像性能は3つの2乗和で表すことができる。その結果を模式的に図で表し たものが図3.9である。この結果を見ると、すざく搭載の望遠鏡では、反射鏡の位置決め誤差が最も結 像性能の決定に寄与していることが分かる。



図 3.9: すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の結像性能決定要因—それぞれが独立要因なため、全体での結像性能は2乗和 で表すことができる。

3.2.5 位置決め誤差の要因

位置決め誤差は、3.1 で述べたように反射鏡個々の組の結像位置がばらついてしまうため、つまり、反 射鏡1組ごとの反射鏡のなす角が変化しているために生じている。反射鏡のなす角が変化すると個々の 組での焦点距離が変化してしまう。(図 3.10)特にアラインメントバーは4段に分かれているため、反射 鏡の位置を決めるためには4本のアラインメントバーを正確に設置しなければいけない。さらに、望遠 鏡が上下2段に分かれているため、仮にアラインメントバーを正確に望遠鏡ハウジングに取り付けたと しても、上下段の組付けの際にさらに自由度が生まれてしまう。また、アラインメントバーを上下2段 組み合った望遠鏡に対して、完璧な位置に調整が行なえたとしても、反射鏡と溝との間に 50µm の遊び が存在するため、反射鏡は溝の中で角度を変化させ、やはり反射鏡のなす角が変化してしまう。

このような理由から、アラインメントバーを用いて、反射鏡を設計値の通りの位置、なす角に設置す ることは非常に困難であり、位置決め誤差を押さえ込むためには、アラインメントバーによる反射鏡支 持の改善が必要不可欠である。



図 3.10: 反射鏡のなす角と焦点距離の関係 – なす角が大きいほど望遠鏡から遠い位置で結像する。

②50µmの溝の遊び のために反射鏡個々が ばたつく 50µm アラインメントバー 反射鏡 ①4段のアラインメントプレートが 個別に動き、反射鏡のなす角が変化する

図 3.11: アラインメントバーの問題点—4 段が別々に動き、反射鏡と溝との間に 50µm の隙間があるため。

第4章 レプリカ法による反射鏡の製作

斜入射光学系において、軽量かつ高い開口効率を実現するためには、反射鏡基板を薄くし望遠鏡の動径 方向に多数枚積層する必要がある。しかし、薄い基板を用いた反射鏡は*Chandra*衛星に採用された厚い ガラス基板を用いた反射鏡のように、研磨などにより直接的な加工が困難である。そこで、このような 薄い基板を用いた反射鏡の製作法として考え出されたのがレプリカ法である。日本の天文衛星であるす ざくでもこの手法で作られた反射鏡を搭載した望遠鏡が使われている。

ここでは、レプリカ法による反射鏡基板の製作方法とその現状について話す。

4.1 レプリカ法

レプリカ法とは、平滑なガラス母型(ガラスマンドレル)に反射鏡面の素材である金を成膜し、エポキ シ樹脂などの接着剤を用いて薄い基板に反射膜を写し取る方法である。レプリカ法による反射鏡製作は 以下のような流れで行われる。

1. 基板の製作

- 基板の切り出し
- バリ取り
- 3 点ローラーによる粗成形
- 基板の洗浄
- 熱成形

2. 反射膜の成膜

- ガラスマンドレルの洗浄
- 成膜

3. 基板と反射膜の接着

- エポキシの噴霧
- 基板の圧着と硬化

4. 基板の剥離

このようにして製作される反射鏡は母型であるガラスマンドレルの形状を反映するため、直接的に基 板の表面加工を行わなくても形状のよい反射鏡を製作することができる。以下では、それぞれの工程に ついて詳しく説明する。

4.2 反射鏡製作の手順

4.2.1 基板の製作

反射鏡は製作の容易さから、2次曲面を円錐面で近似した形状をしている。また、材質には厚さ150µm のアルミニウム¹を用いている。

基板の切り出し

基板の切り出しとは、基板の外形である円錐形を切り出す作業である。100枚ほどのアルミ板を重ね、 数 μm での加工が可能な放電加工²で切り出す。このアルミ基板は(株)オオイシに切り出して頂いた。

バリ取り

アルミ基板を放電加工を用いて切り出すと、その加工の端面に図 4.4 の様に放電白層 (バリ) と呼ばれ るアルミニウムの固まり (10µm 角程度) が付着する。このバリが存在すると、後の熱成形の行程の際、 深刻な基板形状の悪化を招いてしまう。そのため、ここでは電動やすり (ルーター)を用いて荒くバリを 削り、最後に 1500 番の紙やすりを用いて仕上げる。

その後、ルーターおよびやすりがけによるゴミを除くためイソプロピルアルコールで超音波洗浄する。



図 4.1: (左) 放電加工時にできる放電白層(右) バリ取りの様子 – 放電白層は 10µm 角程度の大きさ。

3点ローラーを用いた粗成形

バリを除去したアルミ基板を、3点ローラーを用いて円錐面の一部になるように粗成形をする。この行 程は次の熱成形の行程をより容易にするために行なう。ロールの際、反射鏡表面にゴミなどが付着する と基板の表面に凹凸を作ってしまう。この凹凸はこの後行う熱成形では取り除くことができない。よっ て、ロールがけはゴミなどを挟まないように慎重に行う。

¹以前は反射鏡の材質に純アルミである 1050-H18 材を使用していた、現在では基板の強度を増やす目的で 5052-H??材 (?? は厳密に分類できないため)を使用している。本論文において、望遠鏡に組み込み X 線により評価した反射鏡は、アルミ基板 に 1050-H18 材と 5052-H??材を用いて作成したものがそれぞれある

²電極と被加工物との間で放電を起こさせ、被加工物の一部を除去することで非常に精度の良い加工が行なえる。ただし、 被加工物は導体に限る。



図 4.2: ローラーによる粗成形の様子

アルミ基板の洗浄

この後に行う熱成形によってアルミ基板の形状は決定される。熱成形は多数の基板を積層しているの で、基板にゴミなどが付着すると、積層した全ての基板にその影響が伝搬してしまい、形状に大きな影 響を与えてしまう。これまで、熱成形直前には乾燥空気を使って表面の汚れを取る程度であった。しか しこのゴミの除去を徹底して行うため熱成形前に再び洗浄を行う。洗浄は図 4.3 のように、反射鏡を立 てた状態でイソプロピルアルコールで超音波洗浄する。



図 4.3: 超音波洗浄

熱成形

熱成形とは、ローラーを用いて粗成形したアルミ基板を、反射鏡の形状に加工された金型に大気圧を 用いて押し付け、200°Cで10時間成形することで円錐面の一部の形状を作り出す行程である。複数枚 の粗成形を行なったアルミ基板を重ね、一度に熱成形を行なうことで、多量の反射鏡の基板を製作する ことができる。この際にアルミ基板にバリが残っていると、全ての反射鏡を反らせる原因となる。また、 多数の基板を積層しているので、金型にゴミなどが付着すると、積層した全ての基板にその影響が伝搬 してしまい、形状に大きな影響を与えてしまう。そのため、重ねる直前には再度表面を確認しほこりな どをはさまないようにする。



図 4.4: 熱成形の模式図



図 4.5: 熱成形の様子—この状態で 10 時間 200 C°の熱を加える。

4.2.2 反射膜の成膜

反射膜のガラスマンドレルへの成膜はスパッタリング法を用いて行なわれる。ガラスマンドレルへの 成膜を行なう際の行程としては、(1) ガラスマンドレルの洗浄(2) 成膜の2工程がある。

ガラスマンドレルの洗浄

レプリカ法の要となるガラスマンドレルは、その形状を反射鏡鏡面に写し取るために使用するので、 汚れや傷などがその表面にある場合、反射鏡鏡面にその形状を写し取ってしまい大きな形状の悪化を招 く原因となる。そのため、洗浄は非常に慎重にかつ丁寧に行なう必要がある。洗浄の工程はイオン交換 水をマンドレルに掛けながら、ガラスマンドレルについている金やゴミなどを除去していく。その後に、 エアーで完全にマンドレル表面の水滴を飛ばす。これは、イオン交換水の中に含まれている不純物をガ ラス表面に残さないようにするためである。最後に、50°Cの恒温槽に入れ乾燥させる。

成膜

洗浄し終わったガラスマンドレルに反射鏡面となる金を成膜する。金の成膜には、スパッタリング現象を利用した大阪真空社製のDCマグネトロンスパッタ装置を使用した。成膜はガラスマンドレルを一定の速度で回転させることにより、ガラスマンドレルの円周方向に均一に金を成膜する。(図 4.6 参照)

ここでスパッタリング法について説明する。高真空 (1mTorr)の電極間にスパッタガスと呼ばれるガス を流し込むと、高エネルギーの宇宙線などにより電離されて一次電子が作られる。ここにターゲットを 陰極として数 100~1000V 程度の高電圧を引火すると、電子は電場と逆方向に加速され、エネルギーを 増しながら次々にガスを電離する。このようにして、電極間にグロー放電によるプラズマが形成される。 スパッタリング装置では、このプラズマ中の陽イオンを電場により加速させ、ターゲットに衝突させる ことにより、この陽イオンの運動エネルギーを得てターゲット物質が飛び出す。これをスパッタリング 現象と呼び、この現象により発生した粒子をスパッタ粒子と呼。また、スパッタガスには化学的に安定 で多くのスパッタ粒子を得られる Ar ガスを使用している。

スパッタリング法の最大の利点は生成した成膜物質の粒子が、keV 程度の陽イオンと運動量を交換し て生じるため、10eV オーダーの高いエネルギーを持つことである。このようにして形成された薄膜は、 表面での原子の移動が起こりやすいのでより緻密な膜になる。またスパッタ法は成膜速度が一定で膜厚 の制御性が優れていることも利点の1つである。

スパッタリング法の欠点としては、スパッタガスを導入するので真空度を高くすることができないこ とである。このスパッタガスが成膜中に混入するため、純粋な薄膜を得ることが困難であるといわれて いる。

今回用いた DC マグネトロンスパッタ装置は、放電空間に磁場をかけることにより成膜速度を大きくしたものである。電子は磁場によるローレンツ力を受けてサイクロトロン運動をするようになる、そのため電子をターゲット近傍に閉じ込めることができるため、陽イオンの生成率を上げ、成膜速度を大きくすることができる。また、低いガス圧で安定したプラズマを作り出すことが可能である。

25



蒸着前

蒸着後

図 4.6: 金の成膜 – 左図:模式図–ターゲット近傍には永久磁石によりアルゴンのプラズマが閉じ込められ、電場によりア ルゴンイオンがターゲットに打ち込まれる、右図:実際の作業の様子

4.2.3 基板と反射膜の接着

アルミ基板に接着剤を噴霧し、成膜を行なったガラスマンドレルとの接着を行なう。

エポキシの噴霧

アルミ基板とマンドレルとを接着するために、接着剤であるエポキシを噴霧する。接着に用いるエポ キシは、Epoxy Technology Inc 社製の EPO-TEK 301-2 を使用した。EPO-TEK 301-2 は A 剤、B 剤の 2 種 類の溶液からなっており、重量比で A 剤:B 剤=10:3.5 に混合すると常温 (23°C) で 2~3 日で完全に硬化す る。実際に噴霧する際、エポキシは粘性が高く噴霧には向かない。そのため、A 剤とB 剤を混合した重 量の 6%のトルエンを混合し、粘性を下げ噴霧を行なう。エポキシの噴霧は、アルミ基板全体に均一に 20µm 程度に、かつ厚さを数 µm でコントロールする必要がある。そのシステムについては図 4.7 に載せ る。エポキシを圧搾空気との差圧を用いて吸い上げ、噴霧を行なう。



図 4.7: エポキシ噴霧の様子--スプレーノズルが上下に1往復し、反射鏡が等しい角度で回転する。その行程を反射鏡全面にエポキシが付着するまで繰り替えす。

基板の圧着と硬化

エポキシをつけたアルミ基板をマンドレルに接着する。しかし、エポキシにはトルエンや空気などが 混入しているために、そのまま接着すると、厚さムラ等の原因となるため、これらを脱泡した後に接着 を行なう必要がある。そのため、エポキシをつけたアルミ基板とマンドレルとの接着は真空中で行なう。 トルエンや空気は、約 30Pa で完全に脱泡が完了するので、その後に接着を行なう。接着後は、50 C°の 恒温槽に入れ、10時間以上硬化させる。



図 4.8: 圧着の様子—中の真空度が 30Pa を切ったらマンドレルを下げて接着する。

4.2.4 基板の剥離

アルミ基板のマンドレルからの剥離は、レンズクリーナーを用いて、直接マンドレルとアルミ基板と の間に力を加えて行なっていた。しかし、これは、剥離時に形状の悪化を招いてしまっていた。そこで、 新たな剥離の方法として、水を用いた方法に変更した。まず、テープなどでアルミ基板の端部分をほん の数 mm 程度浮かせる。その隙間にナフロンシートを差し込み、静電気で再びマンドレルとアルミ基板 がつかないようにする。そして、ナフロンシートとマンドレルとの間にイオン交換水を少しづつ流して いく。すると、アルミ基板とマンドレルが徐々にはがれていく。剥がした後は、直ちに反射鏡の鏡面に ついている水分をエアーで完全に飛ばす。剥離後、反射鏡の縁からはみ出した余分なエポキシと金を、 剃刀で落とし、反射鏡は完成となる。





図 4.9: 剥離の様子 – アルミ基板とマンドレルとの間に水を流すと自然に金とマンドレルの境界が剥がれていく。

4.3 反射鏡の形状評価

4.3.1 反射鏡形状の測定

反射鏡の鏡面形状の測定は三鷹光器製レーザー変位計 NH-3NS を用いて行なう。その詳しい原理については、付録 A.1 に載せる。図 4.10 に示すようにまず、反射鏡の母線方向の端から 5mm 中心方向に入った点を円周方向に測定し、最下点の X、Y 座標を求める (1)。同様に逆方向の最下点の X、Y 座標を求る (2)。その 2 点を結ぶ直線を、その 2 点の中点が原点となるようにアラインメント機能を用いて測定軸を 作成する。そして、この軸にそって形状を 100 µm ピッチで測定する。測定の方向は、内側振分け³を用いた。



図 4.10: 反射鏡の母線形状の測定---反射鏡両端の最下点を求め、その点を結ぶ軸を断面形状測定する。軸は反射鏡の top 側を正となるように取る。

4.3.2 形状の評価

鏡面形状の評価は、反射鏡鏡面の法線分布を用いる。評価方法については図 4.11 に載せる。まず、得られたデータ点を 3mm ごとに区切り、その区間で高さ平均を求める。ここで得られた 3mm ごとの平均の高さの点を直線で結ぶ。形状評価はこの折れ線の法線の平均の方向に対するばらつきを用いて行う。 形状誤差の項目と同様に、平均の方向を中心とする全点の半分の点が入る円の直径 HPD を用いて表す。

³原点をスタートにまず正の方向 (図 4.10 の (3) の方向) に測定する。測定範囲分の断面形状測定が終了すると、原点に戻り 負の方向 (図 4.10 の (4) の方向) に測定範囲分の断面形状測定を行なう。



図 4.11: 反射鏡形状の評価方法-大きく分けて4項目に分かれる。

図 4.12 に実際に上記の方法を用いて評価した反射鏡の例を示す。図 4.12(左) は実線で描かれたもの が反射鏡で、同時に点線で描かれたものが、対応するガラスマンドレルの母線の形状である。ガラスマ ンドレルの形状については大きさが NH3-NS の測定範囲を超えるため、レーザー変位計を用いて評価し た。図の中に描かれている数値は、図 4.11 の方法で見積もった、2 回反射相当の HPD である。また図 4.12(右) には反射鏡と同様に NH3-NS で評価した熱成形後のアルミ基板の形状を比較のため点線で載せ てある。熱成形後のアルミ基板の端の部分が高さ負の方向に 3µm ほど落ちているのは熱成形前のバリの 除去が十分に行えなかったため、バリの形状の伝搬が起ったためである。

ここで、ガラスマンドレルとの形状図 4.12(左)を比較を見ると、母線上の高さ方向の形状は±1µm ほ どで一致しているのがわかる。また、見積もった HPD についても、ガラスマンドレルの 0.38 分角に対 し、反射鏡では 0.41 分角となり、ほとんど HPD も反映されていることが分かる。さらに、図 4.12(右)を 見ると、端の部分の変形に反射鏡の形状が影響されていないことがわかる。これは、エポキシ樹脂がア ルミ基板の形状の歪みを吸収し、反射鏡面の形状に影響を及ぼさないためである。これらのことから、 この反射鏡についてはレプリカ法による反射鏡の製作は成功していると言える。



図 4.12: ガラスマンドレルの形状を写し取れている反射鏡—(左)反射鏡と対応するガラスマンドレルの形状(右) 反射鏡と対応する熱成形後のアルミ基板の形状

図 4.13 も同様の方法製作した反射鏡である。図 4.12 と同じく、(左) はガラスマンドレルの形状との比較、(右) は熱成形後のアルミ基板との形状の比較である。この反射鏡はから熱成形基板の形状に影響は受けていないが、左の図よりガラスマンドレルの形状は PV(Peak to Valley) が 2µm 程度であるのに対し、反射鏡は PV が 4µm 以上ある。また、ガラスマンドレルの形状はわずかに下に凸な形状であるのに、反射鏡は上に凸な形状である。これらのことからガラスマンドレルの形状を反映していないことがわかる。また、HPD についてもガラスマンドレルが 0.42 分角であるのに対し、反射鏡は 1.04 分角と悪化していることがわかる。



図 4.13: ガラスマンドレルの形状を写し取れていない反射鏡—(左)反射鏡と対応するガラスマンドレルの形状(右) 反射鏡と対応する熱成形後のアルミ基板の形状

これまで製作した反射鏡にはこういった図 4.12 のようなレプリカが成功し形状がよくできたものと、 図 4.13 のように形状がうまく写し取れていないものが存在する。その原因にはエポキシのアルミ基板に 噴霧時のムラや、圧着時のエポキシの広がり型のムラなどが考えられるが、その原因については、まだ はっきりと分かっていない。今後、形状のよい反射鏡を作る上ではその原因を追求し、常にガラスマン ドレルの形状を写し取ることができるようにする必要がある。
第5章 新しい反射鏡支持機構とその調整

3章で述べた通り、すざく衛星搭載のX線望遠鏡には、反射鏡を支持する機構に結像性能を悪化させて いる要因があった。そこで、新たに4段一体型の支持機構であるアライメントプレートを導入しその改 善をはかった(2006年大熊修論)。今回、さらにこのアライメントプレートを改良し、マイクロメーター による望遠鏡ハウジング内での調整機構の導入により位置決め精度の向上を試みる。

5.1 新しいアライメントプレートの開発

5.1.1 アライメントプレートの導入とこれまでの経緯

従来の支持機構である、アライメントバーには、「(1)反射鏡個々の傾きが変化する、(2)1 組の反射鏡のなす角が変化する。」という問題があり、位置決め誤差として、結像性能の大きな悪化要因になっていた(§3.2.3~3.2.5)。この2点を改善するために、新たな反射鏡支持機構として、「アライメントプレート」を導入し、位置決めを精度の改善をはかった。このアライメントプレートには以下のような改良点がある。

1. 反射鏡のなす角の変化を抑えるためにアラインメントバーを4段一体型に変更した(図 5.1)。

2. 反射鏡個々の傾きの変化を抑えるために、溝と反射鏡の間の遊びを 50µm から 15µm に変更した。



図 5.1: アラインメントバーからアラインメントプレートへの変更-4段-反射鏡のなす角は加工精度で決まる。

こういった新機構の導入により、3章で述べた位置決め誤差を改善することができた。しかし、反射 鏡とアライメントプレートの溝には15µmの遊びが残り、これが位置決め誤差を改善する限界になって いる。 また、この残りの溝を埋めるためにスペーサーとして、アルミナイズドマイラー (厚さ 15μm)を挿入 することにより実効的な溝の遊びを 0μm にした。その結果、反射鏡個々の位置決めを改善することがで きたが、反射鏡にストレスがかかり、形状に悪影響を与える結果になった (2006 年 大熊修論)。

5.1.2 アライメントプレートの改良

今回、位置決めを改善するとともにストレスによる形状の歪みを与えないために、アライメントプレートを改良した。それは、1枚のアライメントプレートを2枚に分け、うち1枚を反射鏡挿入後に内側に押し込むことで、溝の実効的な遊びをなくすというものである。この溝を減らす調整を行うために、これまで精度よく加工された内壁につき当ることのみにより、望遠鏡ハウジング内での位置を決めていたアライメントプレートをマイクロメーターを用いて微調整ができるように改良する。

図 5.2、5.3 にその原理を示す。



図 5.2: マイクロメーターによる調整 - プレートの外側の耳をマイクロメーターで押し引きすることによりハウジング内での位置を調整する



プレートをスライドさせる事により溝の遊びを詰める

図 5.3: 溝の遊びの解消— 厚さ 0.5mm のプレートをマイクロメーターで押して調整

これまでアライメントプレートは、材質はアルミニウムで厚さを 1.5mm で製作してきた。しかし今回は、これを厚さ 1.0mm と 0.5mm のものに分けた。このうち、厚さ 0.5mm のものを、反射鏡挿入後にス

ライドさせ、溝の遊びを詰める。また、薄くなったことによる、強度不足を解消するため、材質をアル ミニウムからステンレス (SUS304) に変更した。

実際に製作したアライメントプレートの写真を図 5.4 載せる。今回のアライメントプレートの製作は 反射鏡の切り出しと同じく(株)オオイシに精密な加工が可能な放電加工を使い製作して頂いた。溝は 深さが 5.1mm で、ボトルネック状の構造になっている(図 5.5)。今回はすざくの 40 番から 49 番、71 番 から 80 番、90 番から 99 番、150 番から 159 番にあたる計 40 組の反射鏡用の溝を製作した。このボトル の首にあたる狭くなった部分で反射鏡を支持する。また溝は反射鏡の傾きに合わせた角度をつけて加工 している。

以下に前回製作したアライメントプレートからの変更点をまとめる。

- 1. 厚さ1.5mm で1枚だったアライメントプレートを、厚さ1.0mm の基準となるプレートと厚さ0.5mm のスライドさせる補助となるプレートに分離した。
- 2. 強度を補いバリを減らすため、アライメントプレートの材質をアルミニウムからステンレス (SUS304) に変更した。
- 3. 反射鏡の遊びを後から詰めることが可能なため、溝の遊びを 15µm から 35µm に変更し、反射鏡の挿入を容易に行えるようにした。



図 5.4: 新しく製作したアライメントプレート— (左) 厚さ 1.0mm(右) 厚さ 0.5mm



図 5.5: アライメントプレートの溝の部分—ボトルネック上の構造になっている

5.2 アライメントプレートの形状評価

5.2.1 溝位置の測定

アライメントプレートにより支持される反射鏡の2枚のなす角は、溝の位置の加工精度によって決められる。今回加工して頂いた、アライメントプレートの溝の位置を三鷹光器株式会社所有の NH-5N を 用いて測定した。その詳しい原理については付録の A.1.1 に載せる。

溝の位置の測定はエッジ検出を応用した「溝幅測定」機能を用いて行う。図 5.6 のように 2 辺のエッジ をエッジ検出機能を用いて求め、そのエッジにそれぞれ直線を引く。その 2 直線の交点から 2 直線のな す角を 2 等分するように線を引き、その 2 等分線に垂線を下ろし、その交点の座標を溝位置とする。そ のとき、同時にエッジから溝位置までの距離を「溝幅」として出力する。この機能を用いた溝位置の測 定結果は表 5.1、表 5.2 と、図 5.7 の通りである。ずれの値が正であれば設計に比べ望遠鏡の外側に、負 であれば設計に比べ内側にずれていることになる。



図 5.6: 溝位置測定の概念図 – 溝の両側でエッジ検出を行い、溝のパラメーターを計算する。

設計値からのずれ量 [µm]				
溝番号	Primary top	Primary bottom	Secondary top	Secondary bottom
40	-5	-7	-9	-4
41	-8	-10	-12	-6
42	-7	-10	-11	-7
43	-7	-11	-12	-6
44	-8	-10	-11	-6
45	-8	-10	-11	-6
46	-7	-10	-11	-6
47	-7	-10	-11	-6
48	-7	-10	-11	-5
49	-7	-7	-9	-4
71	-6	-6	-6	-1
72	-6	-7	-9	-2
73	-7	-7	-9	-3
74	-6	-7	-8	-3
75	-6	-7	-8	-2
76	-6	-6	-7	-2
77	-6	-7	-6	-2
78	-6	-8	-7	-3
79	-6	-8	-6	-1
80	-5	-6	-6	-1
90	-1	-5	-2	-0
91	-3	-6	-4	-1
92	-3	-6	-6	-2
93	-3	-5	-5	-3
94	-4	-6	-4	-2
95	-4	-6	-5	-1
96	-3	-6	-4	-1
97	-3	-5	-4	-2
98	-3	-4	-4	-2
99	-3	-4	-4	0
150	-3	-3	-1	1
151	-2	-5	-3	0
152	0	-4	-3	0
153	-2	-4	-3	-0
154	-2	-2	-3	-1
155	-1	-4	-2	-1
156	-3	-4	-6	-1
157	-2	-4	-2	-1
158	-2	-3	-4	-1
159	-2	-3	-3	0

表 5.1: アラインメントプレート各部分の設計値からのずれ (厚さ 1.0mm) — 測定値の誤差は ±1µm 程度

設計値からのずれ量 [μm]				
溝番号	Primary top	Primary bottom	Secondary top	Secondary bottom
40	-3	-4	-4	-4
41	-5	-6	-8	-6
42	-5	-6	-9	-6
43	-6	-6	-8	-7
44	-5	-7	-9	-7
45	-5	-7	-8	-6
46	-6	-7	-7	-6
47	-7	-5	-8	-6
48	-6	-5	-8	-6
49	-4	-5	-3	-4
71	-3	-4	-3	-2
72	-4	-6	-5	-3
73	-3	-6	-4	-4
74	-4	-5	-4	-4
75	-4	-5	-5	-3
76	-4	-5	-5	-5
77	-5	-5	-4	-3
78	-4	-6	-4	-3
79	-5	-6	-4	-3
80	-4	-4	-2	-3
90	-3	-5	-4	-1
91	-5	-5	-5	-3
92	-5	-5	-5	-2
93	-5	-5	-4	-2
94	-5	-5	-4	-3
95	-5	-6	-4	-3
96	-2	-5	-3	-2
97	-2	-5	-4	-3
98	-4	-5	-4	-2
99	-3	-4	-2	-2
150	-2	-3	-4	-1
151	-3	-3	-4	-1
152	-2	-3	-4	-2
153	-3	-3	-4	-3
154	-4	-3	-4	-1
155	-2	-2	-3	-1
156	-2	-2	-4	-2
157	-3	-2	-3	-2
158	-2	-2	-3	-3
159	-3	-3	-3	_2

表 5.2: アラインメントプレート各部分の設計値からのずれ (厚さ 0.5mm) – 測定値の誤差は ±1µm 程度



Groove position t1.0mm

図 5.7: アラインメントプレートの溝位置の設計値からのずれ – 横軸は溝の ID、縦軸は溝の設計値からのずれ

溝の位置測定の結果を見ると、どの溝も設計値に対して 10µm 以内にずれは押さえられているのがわ かる。また、図 5.7 を見ると、どちらのプレートとも若い番号の溝(望遠鏡の中心に近い溝)ほど内側 にずれている。また、2枚のアライメントプレートを比較すると、厚さが 1.0mm のプレートの方が厚さ 0.5mm のものに比べて溝の位置によるずれ量の差が大きい。

5.2.2 なす角のずれ

望遠鏡に反射鏡を組み込む際に、最も問題となるのはなす角のずれである。なす角がずれると焦点距 離が変化し結像性能に影響する(図 3.10)。ここでは測定された溝の位置からなす角のずれを見積もる。



図 5.8: 溝位置からなす角の導出

図 5.8 のように、Primary top、Primary bottom、Secondary top、Secondary bottom の座標を (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 、 (X_3, Y_3) 、 (X_4, Y_4) と定義する。反射鏡の望遠鏡光軸からの傾きを Primary、Secondary について、 それぞれ θ_p 、 θ_s とすると、

$$\theta_p = \arctan\left(\frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2}\right) \tag{5.1}$$

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{X_3 - X_4}{Y_3 - Y_4}\right) \tag{5.2}$$

となる。

よって2枚の反射鏡のなす角は180°-($\theta_s - \theta_p$)となり、設計値は $\theta_p = \theta$ 、 $\theta_s = 3\theta$ で、なす角が180°-2 θ なので、そのずれ $\Delta \theta$ は

$$\Delta \theta = 180^{\circ} - (\theta_s - \theta_p) - (180^{\circ} - 2\theta)$$
(5.3)

$$= 2\theta - (\theta_s - \theta_p) \tag{5.4}$$

となる。計算した結果を厚さ 1.0mm については表 5.3、図 5.9 に、厚さ 0.5mm ついては表 5.4、図 5.10 まとめる。

溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]
40	0.273	71	0.208	90	0.190	150	0.052
41	0.268	72	0.292	91	0.233	151	0.220
42	0.286	73	0.245	92	0.256	152	0.287
43	0.362	74	0.233	93	0.164	153	0.173
44	0.338	75	0.189	94	0.102	154	0.052
45	0.252	76	0.203	95	0.234	155	0.167
46	0.368	77	0.150	96	0.260	156	0.212
47	0.281	78	0.240	97	0.090	157	0.159
48	0.314	79	0.248	98	0.111	158	0.194
49	0.228	80	0.244	99	0.196	159	0.182
平均	0.297		0.225		0.184		0.170

表 5.3:1 組の反射鏡のなす角の設計値からのずれ-厚さ 1.0mm



図 5.9: 反射鏡のなす角の設計値からのずれ-厚さ 1.0mm-横軸は溝の ID、縦軸はなす角の設計値からのずれ

溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]	溝	なす角ずれ [分角]
40	0.048	71	0.062	90	0.201	150	0.177
41	0.086	72	0.133	91	0.114	151	0.122
42	0.171	73	0.115	92	0.126	152	0.108
43	0.059	74	0.024	93	0.088	153	0.059
44	0.183	75	0.062	94	0.006	154	0.084
45	0.111	76	0.028	95	0.074	155	0.111
46	0.099	77	0.029	96	0.141	156	0.072
47	0.066	78	0.107	97	0.138	157	0.065
48	0.031	79	0.113	98	0.135	158	0.028
49	0.060	80	-0.028	99	0.060	159	0.065
平均	0.091		0.065		0.108		0.089

表 5.4:1 組の反射鏡のなす角の設計値からのずれ-厚さ 0.5mm



図 5.10: 反射鏡のなす角の設計値からのずれ-厚さ 0.5mm-横軸は溝の ID、縦軸はなす角の設計値からのずれ



図 5.11: なす角の変化による焦点距離の変化

結果を見ると、アライメントプレートの溝の位置の設計値からのずれによるなす角のずれは、平均で 厚さ 1.0mm のプレートは 0.218 分角、厚さ 0.5mm のプレートは 0.088 分角となっている。これは 4 章で も述べた通り、焦点距離が伸る要因となる (図 5.11 参照)。例として 90 番台の反射鏡で焦点距離を見積 もると、基準となる厚さ 1.0mm のアライメントプレートの 90 番台のなす角のずれの平均は 0.184 分角、 primary の設計値の傾き角 θ は ~ 0.345° なので、

$$FL = 4750 \times \frac{\tan 4\theta}{\tan(4\theta - 2\Delta\theta)}$$
(5.5)

$$=4750 \times \frac{\tan(4 \times 0.345)}{\tan(4 \times 0.345 - 2 \times 0.184/60)}$$
(5.6)

$$=4771$$
mm (5.7)

以上より焦点距離が、設計値である 4750mm に比べて、21mm 長くなっていることがわかった。また、 このなす角のずれ $\Delta \theta$ は望遠鏡からの距離 4750mm においては、像に半径 2 $\Delta \theta$ =0.368 分角の広がりをも たらす。

5.3 アライメントプレートの調整

反射鏡を精度よく望遠鏡内に配置するためには、精度よくアライメントプレートを加工するとともに、 設計通りの位置に望遠鏡ハウジング内にプレート自身を配置する必要がある。アライメントプレートに は望遠鏡ハウジング内で動径方向への「並進」とプレート面上での「回転」の自由度を持つ(図 5.12 参 照)、これまで、これまでアライメントプレートは望遠鏡ハウジング内の精度よく加工された内壁(表面 の加工精度が Peak to Valley で ±2µm)につき当ることにより、設計通りの位置に配置してきた。しかし、 この方法では、アライメントプレートの配置を容易にできる反面、後からの位置の微調整を行うことが できない。

今回、新たにマイクロメーターを用いてアライメントプレートの位置を調整することを試みた。その 思想は、まず精度のよい内壁にプレートをつき当ることにより大まかな配置を行う。そして、その位置 を確認しながら、目標の位置にプレートをスライドさせていくというものである。また、アライメント プレートを2枚に分離したため、反射鏡を挿入後に1枚(厚さ0.5mm)の位置をマイクロメーターを用い て調整することにより、溝の遊びを減らし反射鏡の位置のばらつきをなくすように試みた。



図 5.12: アライメントプレートの並進と回転 -- プレートはその面内において「並進」と「回転」の自由度を持つ

5.3.1 ハウジングの改良・調整治具の製作

今回、新たにマイクロメーターをハウジングに取りつけて調整を行うため、昨年製作したハウジング (大熊ハウジング)の改良をおこなった。具体的に改良した部品は上部及び下部でアライメントプレート を支えるL字柱を大熊ハウジングの25mmから45mmに長くした。L字柱を長くすることで、2枚に分 離したアライメントプレートのハウジングとの固定部分を独立に確保した。同時にL字を長くしたこと に伴い、外壁の高さを上下20mmずつ計40mm短くし、さらに側壁についても外壁との固定するネジ穴 の位置を変更した。今回新たに製作した部品の図面については巻末に載せる。また、図5.13はアライメ ントプレートを除く部品、図5.14に組み上げ後の写真を載せる。

また同時に、アライメントプレートの位置を調整するために、望遠鏡ハウジングおよびアライメント プレートに取りつける治具を製作した。図 5.15、5.16 に製作した治具の写真を載せる。図 5.2 に示した ようにマイクロメーターでアライメントプレートを押し引きすることで、望遠鏡ハウジング内での動径 方向の位置を調整する。そのためマイクロメーターはヘッドの部分が回転しないで伸び縮みするミツト ヨ製 MHK-25VR を採用した。また、その他の治具についてはハウジングと調整治具は三鷹光器株式会 社に製作して頂いた。また、調整治具のアライメントプレートを掴むスリット部分は精度が必要なため、 (株)オオイシに放電加工により製作して頂いた。



図 5.13: ハウジングを構成する部品 — 上左から下右に、外壁、下板、上板、上下L字柱、リテナープレート、内壁、側 壁 2 枚



図 5.14: 組上がった望遠鏡ハウジング(左): アライメントプレートなし、(右): アライメントプレート有り



図 5.15: 調整に要する治具 — 左から、厚さ 0.5mm のアライメントプレートとマイクロメーターをつなぐ治具 2 個、厚さ 1.0mm のアライメントプレートとマイクロメーターをつなぐ治具 2 個、調整用のマイクロメーター 2 個、マイクロメーターを ハウジング外壁に固定する治具



図 5.16: アライメントプレートを調整する治具(左):マイクロメーターと治具をつないだ様子、(右):実際に取りつけた様子、マイクロメーターをハウジングで固定し、ヘッドの部分でアライメントプレートを押し引きする。

5.3.2 アライメントプレートの調整

ここでは、アライメントプレートの望遠鏡ハウジング内での調整の方法について説明する。

測定システム

アライメントプレートの調整には宇宙科学研究本部にある UKH1 を用いる。その様子は図 5.17 に示 す。UKH1 には X ステージと X ステージの下に CCD を取り付け上下に動くことができる Z ステージが 存在する。今回調整のため、新たに下部にある Z ステージと同等のものを上部にも取りつけた。上下の ステージに取りつけられた CCD カメラには 10 倍のレンズがついており、X ステージが動くことで上下 から望遠鏡上の同じ位置を見ることができるようになっている。また、上下についた CCD カメラを高 さ方向 (Z 方向) に動かすことで測定したい望遠鏡上の地点に焦点を合わせる。



図 5.17: 調整システム—(左):実際の位置測定機構の様子、望遠鏡上にある 10 倍のレンズ付の CCD カメラと同様のもの が望遠鏡の下部にもある。(右):調整機構の概念図、X ステージととも望遠鏡が X 方向に動き、上下の CCD で望遠鏡上の同じ 位置を見ることができる。

アライメントプレートの望遠鏡内での位置の測定



図 5.18: 内壁と切りかき — 望遠鏡の中心部分にある内壁上の旋盤傷とアライメントプレート上に作られた切りかきを上下の CCD カメラで見て、距離を測定する

実際にアライメントプレートの望遠鏡ハウジング内での位置は図 5.18 に示した内壁上の旋盤傷とアラ イメントプレート上の放電加工によって作られた切りかきの相対的な距離を UKH1 のステージエンコー ダーから読み取ることにより調べる。

ここで望遠鏡中心からの位置を知るためには、まず望遠鏡の中心に対する内壁上の旋盤傷の位置を知る必要がある。旋盤傷の中心に対する位置の測定は以下の手順で行う。

- 1. X ステージを動かし CCD で内壁中心を測定する。
- 2. 内壁の中心付近の見やすい旋盤傷を2本選び、それを旋盤傷1、旋盤傷2として、その2本の間の 距離dをXステージのエンコーダーから読み取る。
- この画像を保存し印刷して、旋盤傷1と旋盤傷2の印刷した画像上の半径R₁とR₂を円スケール を用いて測る。
- 4. ここで、内壁上での旋盤傷1、2の実際の半径をr₁、r₂とすると、

$$\begin{cases} r_1 : r_2 = R_1 : R_2 \\ r_2 - r_1 = d \end{cases}$$

となり、これらより

$$r_1 = \frac{R_1}{R_2 - R_1} d$$
, $r_2 = \frac{R_2}{R_2 - R_1} d$

となる。よってこの関係から、実際の旋盤傷の半径 r_1 、 r_2 を求める。

図 5.19 には内壁上の旋盤傷の位置を測定する手順と実際に求めた値を記してある。それぞれ調整の基準に使用したのは旋盤傷1で、その実際の半径はそれぞれ 0.561µm と 0.363µm である。



下側の内壁旋盤傷の位置測定結果



図 5.19: 内壁上の旋盤傷の位置の測定



図 5.20: 内壁—(左): 内壁の測定の様子、内壁中心部にある旋盤傷を確認する。(右):実際に出力された内壁中心の様子



図 5.21: 切りかき — (左): 切りかき位置の測定、アライメントプレート上に放電加工により作られた切りかきの位置を確認 する。(右):実際に出力された top 側の切りかきの様子、上方にあるのが厚さ 1.0mm のプレートの切りかき、下方が厚さ 0.5mm のプレートの切りかき アライメントプレートの位置測定は、図 5.20 のようにまず内壁を CCD に合わせる。さらに先ほど測定 した内壁上の旋盤傷に CCD の中心を合わせた上でステージエンコーダーをリセットする。その後図 5.21 のように、アライメントプレートの切りかき側に CCD の中心が来るようにステージを移動させる。こ こでのエンコーダーの値に先ほど測定により導いた旋盤傷の位置を足したものが、望遠鏡中心からのア ライメントプレートの切りかきの距離になる。今回測定には、設計で望遠鏡の中心に対して 136.870mm 外側にあるべき切りかきをアライメントプレートの位置を測定する基準として用いた。

UKH1のXステージの最小作動ピッチは 0.2μ m であり、ステージエンコーダーの最小分解能は 0.1μ m である。よって、理想的には位置の測定は 0.2μ m 程度のの精度で可能なはずである。しかし、実際には 内壁の旋盤傷の動径方向の幅、およびアライメントプレートの切りかきの加工精度から測定できる精度 は 1μ m 程度である。また同じ内壁と切りかきの間の距離を測定した際の再現性は PV(Peak to Valley) で 5μ m 程度であった。

アライメントプレート調整の手順

アライメントプレートの位置調整は以下のようにして行う。

- 1. 内壁にプレートをつき当てて、ある程度の目標の位置にプレート同士をそろえる。
- 2. マイクロメーターで厚さ 1.0mm のプレートを目標の位置に動かす。
- 3. マイクロメーターで厚さ 0.5mm のプレートを厚さ 1.0mm のプレートと同じ位置に移動させる。
- 4. 反射鏡を挿入する。
- 5. 再び、マイクロメーターで厚さ 1.0mm のプレートを目標の位置に動かす。
- 6. 再び、マイクロメーターで厚さ 0.5mm のプレートを厚さ 1.0mm のプレートと同じ位置に移動させる。

ここで、アライメントプレートの目標の位置とは、図 5.21 の切りかきが望遠鏡中心に対して 136.870mm の位置である。また、全ての工程において、調整の都度 L 字にアライメントプレートをネジで固定する。

今回、4章の方法で試作した反射鏡を10組90番台の溝(90、91、92、93、94、95、96、97、98、99) に挿入した。

図 5.22 に反射鏡挿入後の様子を、図 5.3.2 に調整の手順を示す。



図 5.22: 反射鏡を挿入した望遠鏡—(左):挿入後に側壁をつけずに見た様子。(右):top 側から見た様子。







図 5.23: アライメントプレートの調整

5.3.3 調整後の位置決め精度

マイクロメーターによる調整により、図 5.12 で述べた並進と回転をどの程度抑えることができたか を調べた。これらは調整と同様、CCD カメラを用いて、内壁の基準となる旋盤傷とプレート上の切り かきの距離を測ることにより、望遠鏡中心からのプレートの切りかきの位置を見積もる。また回転につ いては、この測定により得られた中心からのアライメントプレートの切りかきまでの距離を、それぞれ Primary Top 側と Secondary Bottom 側で Pt、Sb とすると、プレートの回転角 θ が θ = arctan(Sb – Pt)/223 となることから見積もった。(図 5.24 参照)

Primary (PT) & Secondary Bottom(SB)

アライメントプレートの回転角



図 5.24: アライメントプレートの望遠鏡内での位置の導出



図 5.25: プレート及びセクターの定義-13枚のアライメントプレートを望遠鏡を上から見て時計回りに ID(Px) を定義 する。セクターはプレート同士および側壁で挟まれた領域で同じく時計回りに ID(Sx) を定義する。

反射鏡を挿入し調整後にアライメントプレートの位置を測定した結果は図 5.26 となった。また図 5.27 は回転を求めた結果である。ここで、プレートの番号は図 5.25 のように定義した。

図 5.26 より、プレートの並進方向のばらつきは端の 13 番のプレートを除き PV(Peak to Valley) で 15µm 程度に抑えられている。反射鏡の厚さに対する溝の遊びは 35µm あるので、13 番のプレートを除けば反射鏡にストレスをかけることなく設計の位置に ±10µm の精度で収めることができた。

今回、位置測定の再現性が 5µm であるにも関わらず、調整後のアライメントプレートの位置が目標 である設計値に対して±10µm になってしまったのは、アライメントプレートをハウジングにネジで固 定する際に、ネジの回転による歪みが生じてしまったためだと考えられる。プレートとネジの間にワッ シャーを挟み、ネジの回転が伝わらないように努めたがやはりプレートの位置は設計値に対して±10µm となった。また、13番のプレートが他のプレートと比較して大きく設計値からずれた位置に取りつけら れてしまったのは、この調整において基準としていた内壁上の旋盤傷(図 5.20)が他のプレートの場合と 比較して端であるため読み取りが困難であったためである。今後、端のプレートも中心と同等の精度で 調整を行うには新たな基準を設ける必要がある。

また、回転については同じく13番を除きPVで0.3分角に収められている。



図 5.26: アライメントプレートの並進方向の位置 — 波線は望遠鏡内での切りかきの設計値 136.870mm



図 5.27: アラインメン トプレートの回転角

溝幅の調整

調整後、さらに溝の遊びを詰めるため厚さ 0.5mm のアライメントプレートを動径方向に押し込んだ。 2006 年の大熊修論より、溝の遊びが 15 μ m で位置決め誤差が 0.59 分角で、遊びを 0 μ m にした時は 0.44 分角と言う結果が得られた。しかし、同時に遊びを 0 μ m にした時は、反射鏡にストレスを与え、形状が 悪化することが分かっている。そこで今回はこの結果を踏まえ、溝の遊びを 10 μ m にすることで、形状 を歪めずに位置決め誤差を抑えることにする。今回の調整は反射鏡の遊びを 10 μ m になるように、厚さ 0.5mm のプレートを厚さ 1.0mm のプレートに対して 25 μ m 内側に押し込む (図 5.28 参照)。

この調整も最初のプレートの調整と同様 UKH1 を用いて行う。しかし、今回は厚さ 1.0mm のプレートに対して相対的に 25µm 内側にプレートを押し込むので、内壁を確認する必要はない。図 5.29 は調整前後のプレートの切りかきの様子である。厚さ 1.0mm のプレートと厚さ 0.5mm のプレートの切りかきの位置を測定することで目標の 25µm 内側に厚さ 0.5mm のプレートを動かしていく。



図 5.28: 溝幅の調整

今回、アライメントプレートの調整による溝幅の変化による結像性能の変化を調べるため次の用に望 遠鏡をその前後で定義する。

- 1. 望遠鏡を組み上げ、アライメントプレートの位置を厚さ 1.0mm と厚さ 0.5mm 両方とも設計上の位置に調整したもの。溝の遊びは 35μm。
- 2. 1の状態を作った後、厚さ 0.5mm のプレートを再調整し、溝幅を \sim 25 μ m 詰めたもの。溝の遊びは \sim 10 μ m。

ここからは、便宜上1を \mathbf{HRXRT}^1 -1、2を \mathbf{HRXRT} -2と呼ぶことにする。

¹High Resolution X-Ray Telescope



調整前

調整後

図 5.29: 調整前後の切りかきの様子-Top 側から見た切りかきの様子



図 5.30: 調整後の厚さ 0.5mm のアライメントプレートの厚さ 1.0mm のアライメントプレートに対する 距離

今回、25µmを目標に厚さ0.5mmのアライメントプレートを内側に押し込んでいったが、今回調整の際、CCDの画像を見ると、望遠鏡の上側の調整についてはどのプレートについてもスムーズに行うことができた。しかし、望遠鏡の下側については、25µmにずらしていくに従って、抵抗が生じ2枚のプレートが開こうとする傾向があった。これについてはのちに議論する。

図 5.30 は調整後に測定した、厚さ 1.0mm のアライメントプレートの切りかきに対する、厚さ 0.5mm のプレートの切りかきの位置をである。実際に溝を詰めた距離は目標の 25μ m に対して、PV で 10μ m 程 度の範囲に押さえられている。また、Primary Top 側と Secondary Bottom 側の調整できた平均の距離は それぞれ 27μ m と 24μ m となった。

第6章 X線による望遠鏡の光学測定

この章では、X線望遠鏡にレプリカ法により製作した反射鏡を挿入し、結像性能の評価を行なった結果 について示す。X線による評価はセクター3から12について行った。¹

結像性能の決定要因を分離するため、望遠鏡の構成要素 (Quadrant、セクター、反射鏡 1 組) ごとに X 線をあて、得られるイメージの広がりとばらつきを調べた。

6.1 反射鏡の形状

今回アライメントプレートに作られた溝のうち 90 番台に宇宙科学研究本部において我々が製作した 反射鏡を 10 組挿入した。製作は4章に示す方法で製作した。また、NH-3NS で中心部分の形状を評価し た結果を以下に示す。



図 6.1: 望遠鏡に挿入した反射鏡の中心部分の鏡面の母線形状-上から 90、91 番の溝に挿入した反射鏡。 左が Primary 右が Secondary。中心に書いてある HPD は 2 回反射相当の HPD

¹ハウジング内において両端のセクターは解法端となっているため、結像性能が極端に悪い。また反射鏡作成の工程においても形状が悪くなることが多いので、両端から2セクターの計4セクターはカバーをして隠してある。



図 6.2: 望遠鏡に挿入した反射鏡の中心部分の鏡面の母線形状 2—上から 92、93、94、95 番の溝に挿入した反射 鏡。左が Primary 右が Secondary。92 の Primary 95 の Secondary の反射鏡の見られる端の 5mm 付近の落ち込みは、前回の望 遠鏡挿入時についた傷による



図 6.3: 望遠鏡に挿入した反射鏡の中心部分の鏡面の母線形状 3—上から 96、97、98、99 番の溝に挿入した反射 鏡。 左が Primary 右が Secondary。

6.2 Quadrant の結像性能

X線による結像性能の評価は、Quadrant全面にX線をあて、1つの望遠鏡としての性能を調べる。

今回、アライメントプレートの調整による溝幅の変化による結像性能の変化を調べるため次の2種類の状態(HRXRT-1、HRXRT-2)でX線による評価を行った。(5.3.3「溝幅の調整」参照)

X線測定は宇宙科学研究本部にある 30m ビームラインを用いて行う。そのシステムの詳しい説明は付録 A.2 に載せる。

宇宙科学研究本部の 30m ビームラインは、高い平行度を実現するため X 線発生装置から測定を行う サンプルまでは、およそ 31m もの距離を取っている。さらにサンプルから X 線発生装置側に約 1m の位 置にはスリットを設置し、その幅を絞ることにより非常に高い平行度 (スリットサイズ 2mm×2mm で約 13 秒角)の X 線ビームを作ることができる。また、検出器をサンプルが乗っているステージを同期して 動かし、サンプル全面に X 線を走査させることで、この高い平行度の X 線をサンプル全面に照射するの と同様の状況を作り出すことができる。

実際の測定は以下の手順で行った。(図 6.4、6.5 参照)

- 1. 4 極スリットを用いてサンプルに当たる X 線ビームサイズを絞り、2mm×2mm(平行度約 13 秒角) にする。
- 2. S_y、D_yを移動させ、X 線ビームが Quadrant 開口部の外側へ当たるようにする。その後、X 線 CCD カメラで露光を開始し、S_y、D_yを同時に動かし、サンプルを横切り、先ほどとは逆側の Quadrant 開口部の外側に X 線ビームが当たる位置まで移動し、CCD のシャッターを閉じる。
- 3. S_z 、 D_z をビームの幅の分だけ移動させる。

4.2、3を反射鏡の入っている部分全てを走査するまで繰り替えす。

今回は X 線発生装置のターゲットには Ti を使用し、これに Ti フィルターを通し単色化した。また測定 は全て W-side(X 線発生装置側からみて左側) にサンプルを配置して行なった。また、サンプルから焦点面 検出器 X 線 CCD) までの距離は HRXRT-1 は 4750mm で行い。HRXRT-2 は 4690mm、4720mm、4750mm で行った。表 6.1 に測定条件をまとめる。



図 6.4: Quadrant 全面のスキャン



図 6.5: ラスタースキャン — サンプルステージと検出器ステージを同期させて動かし、2mm 角のビームを Quadrant 全面 に走査させる。

− 売 6 1・	Ouadrant 全面 7 キ・	ャン時の測定冬件
28 0.11		

X 線発生装置: ターゲット (エネルギー)	Ti (4.51 keV)
X 線発生装置: 管電圧電値/管電流値	10 kV/50 mA
フィルター	Ti 50 μm
X 線ビームサイズ:Y×Z	$2\text{mm}{\times}2\text{mm}$

6.2.1 測定結果

HRXRT-1、2 について Quadrant 全面に X 線を当た結果について示す。また得られたイメージから PSF、 EEF を作り、結像性能の評価を行った。結果を HRXRT-1 は図 6.2.1 に、HRXRT-2 は図 6.2.1 に示す。

HRXRT-1の結果



図 6.6: HRXRT-1のQuadrant イメージの測定結果 (焦点距離 4750mm)(左) 焦点面でのイメージ (中)Point Spread Function(右)Encercled Energy Function

HRXRT-2の結果



図 6.7: HRXRT-2 の Quadrant イメージの測定結果 (左) 焦点面でのイメージ (中)Point Spread Function(右)Encercled Energy Function、上から順に焦点距離 4690mm、4720mm、4750mm となる。

図および図の EEF より得られた HPD をまとめる。

表 6.2: Quadrant の結像性能					
XRT	XRT 焦点距離 [mm]				
HRXRT-1	4750	1.75			
HRXRT-2	4690	1.75			
HRXRT-2	4720	1.47			
HRXRT-2	4750	1.57			

6.2.2 焦点距離

ここで HRXRT2 について X 線での焦点距離を見積もる。望遠鏡の像は焦点距離からずれた時に左右 に偏る、この性質を利用して検出器の距離を変えて得られた像について、結像位置に対して、左側と右 側の光量の比を調べる。左右の光量が等しくなる部分が、その望遠鏡の焦点距離である (LR 法)。その概 念図は図 6.8 に示す。



図 6.8: 焦点距離と像の形 (LR法)
今回測定した Quadrant のイメージからそれぞれ左右の光量の比を出した (表 6.3)。得られた値を見る と、HRXRT-1 については、ほぼ焦点距離であることが分かる。しかし、HRXRT-2 については 4750mm では左右が非対称である。実際に図 6.8 の原理から、HRXRT-2 について焦点距離を見積もった (図 6.9)。 その結果、HRXRT-2 の焦点距離は 4723mm であることがわかった。

今後の測定についてはHRXRT-1については4750mmで、HRXRT-2については4720mmで測定を行った。

表 6.3: Quadrant による像の左右光量の比

XRT	焦点距離 [mm]	左[%]	右[%]
HRXRT-1	4750	58.9	41.1
HRXRT-2	4690	66.4	33.6
HRXRT-2	4720	54.0	46.0
HRXRT-2	4750	35.0	65.0



図 6.9: HRXRT-2 の焦点距離

6.3 結像性能の決定要因の切り分け

Quadrant での結像性能は、4章で述べた通り円錐近似、形状誤差、位置決め誤差により決定される。こ の3つの中で形状誤差は、反射鏡1組にX線を当て、その像の広がりから求めることができる。詳しい 求め方は後に述べる。²位置決め誤差は、Quadrantの結像位置から反射鏡1組ごとの作る像がどの程度 ばらついているかで求めることができる。しかし、測定の原理的な問題で、望遠鏡を回転させずに1組 ごとにX線を当てていくことができない。そのため、望遠鏡を回転させずにイメージが撮像できるセク ターの結像位置を用いる。セクターの結像位置がQuadrantの結像位置からがどれだけばらついているか を求め、その後望遠鏡を回転させセクターの中での1組ごとの結像位置のばらつき求める。すると、位 置決め誤差であるQuadrantの結像位置からの1組ごとの結像位置のばらつきは、Quadrantの結像位置 に対する各セクターの結像位置のばらつきとセクターの結像位置に対する反射鏡1組ごとの結像位置の ばらつきの2乗和で表すことができる。さらに、ある1つのセクターを構成する2枚のプレートの調整 精度によってセクターの結像位置が決定され、反射鏡個々のばたつきによってセクターの中での反射鏡 個々の結像位置が決まる。そのため、結像位置のばらつきをセクターと1組ごとに分離することで、位 置決め誤差の要因がアラインメントプレートの調整精度によるものであるか、溝の中での反射鏡の遊び によるものであるかを区別することも可能になる。

²実際には像の広がりを表す HPD は、円錐近似と形状誤差の2乗和になっている。



Quadrantの結像位置に対する反射鏡1組のイメージのばらつき = {(Quadrantの結像位置に対するセクターの結像位置のばらつき)²+ (セクターの結像位置に対する反射鏡1組のイメージのばらつき)²}^{1/2}

図 6.10: 結像性能決定要因の切り分け

6.4 セクターごとの結像性能

Quadrant での結像性能を、位置決め誤差と形状誤差に切り分けるため、Quadrant を円周方向に分割した、セクターごとのイメージを撮像し、そのイメージの広がりと結像位置を調べる。

6.4.1 測定方法

測定は図 6.11 に示したようにポインティングで反射鏡にビームを照射して行なう。 θ_x 軸を回転させ ずに、4 極スリットでビームサイズを 4mm 角に絞り、4mm ピッチで検出器、望遠鏡を動かし、各セク ターをスキャンしていく。HRXRT-1、2 ともに 10 セクター分 (セクター 3 ~ 12)の測定を行なった。全て のセクターのイメージは Quadrant のイメージを撮像したときと同様回転させずに撮像しているので、セ クターごとのイメージの結像位置が、全てのセクターイメージの足し合わせである Quadrant イメージの 結像位置から、どれだけばらついているかを調べることができる。表 6.4 に測定条件をまとめる。



図 6.11: セクタースキャンの方法 - 4mm 角の X 線を 4mm ピッチで 4 点照射した。

X線発生装置: ターゲット (エネルギー)	Ti (4.51 keV)
X 線発生装置: 管電圧電値/管電流値	10 kV/50 mA
フィルター	Ti 50 μm
X 線ビームサイズ:Y×Z	$4\text{mm}{ imes}4\text{mm}$
各点での露光時間	10 秒

6.4.2 測定結果

例として、HRXRT-1の焦点面でのイメージとEEFを図 6.12、6.13、6.14 に示す。HRXRT-1、HRXRT-2 の測定結果から得られた各セクターの像の広がり(HPD)を図 6.15 と表 6.5 に載せる。また図 6.16、表 6.6 には Quadrant の結像位置を原点としたセクターイメージの結像位置を示す。



図 6.12: HRXRT-1 のセクターイメージ (セクター 3~4)—(左) 焦点面で得られたイメージ (右)Encercled Energy Function



図 6.13: HRXRT-1 のセクターイメージ (セクター 5~08)—(左) 焦点面で得られたイメージ (右)Encercled Energy Function



図 6.14: HRXRT-1 のセクターイメージ (セクター 9~12)—(左) 焦点面で得られたイメージ (右)Encercled Energy Function

セクターイメージの広がり



	図 6.15:	セクター	イメージ	の広がり	(HPD)
--	---------	------	------	------	-------

111/11/11/2		
	HRXRT-1	HRXRT-2
セクター	HPD [分角]	HPD [分角]
3	2.02	2.23
4	1.12	0.95
5	1.92	1.75
6	1.61	1.23
7	1.51	1.44
8	1.51	1.44
9	1.51	1.30
10	1.57	1.33
11	1.23	1.33
12	1.61	2.20
平均	1.56	1.52

表 6.5:]	HRXRT-1,2のセクターイメージの広が「) (HPD)
		-

セクターイメージの結像位置のばらつき



図 6.16: セクターイメージの結像位置— (左)HRXRT-1、(右)HRXRT-2、原点を Quadrant イメージの結像位置としたと きのセクター毎の結像位置

表 6	.6: HRXRT	-1,2 の結像位置のばらつき	<u>—(0,0) は Quadrant イメージの結像位置</u>
-		HRXRT-1	HRXRT-2
	セクター	(ΔD _y [分角], ΔD _z [分角])	(ΔD _y [分角], ΔD _z [分角])
-	3	(-0.44,-0.19)	(-0.28,-0.22)
	4	(-0.50,-0.43)	(-0.46,-0.28)
	5	(-0.20,-0.21)	(-0.49,-0.09)
	6	(0.06,0.03)	(-0.13,0.05)
	7	(-0.01,-0.08)	(-0.02,0.05)
	8	(-0.05,-0.04)	(-0.03,-0.07)
	9	(-0.05,0.03)	(0.10,-0.04)
	10	(-0.05,0.03)	(-0.09,-0.06)
	11	(-0.08,0.16)	(-0.26,-0.00)
	12	(-0.19,0.09)	(-0.43,0.05)
-	分散	0.29 [arcmin]	0.31 [arcmin]

これらの結果を見ると、セクター HPD の広がりについては、全セクターでの平均については大きな 差が見られないものの、端のセクターを除いて HPD が改善しているのが分かる。セクターの像の広がり を生む要因として、セクター単位での各反射鏡の結像位置のばらつき、および角反射鏡の形状誤差によ る像の広がりがある。このどちらが、セクターイメージの改善に効いているのかは後で述べる。また、 セクターの結像位置のばらつきは溝の調整前後でほとんど変化していないことが分かる。これは基準と している厚さ 1.0mm のアライメントプレートの位置決めの精度で各セクターの結像位置は決められてい るからだと考えられる。

6.5 反射鏡1組ごとの結像性能

結像性能決定要因を分割するため、反射鏡1組ごとのイメージの広がりとその結像位置のばらつきを 調べ、前章で得たセクターごとのイメージの広がりの原因を探る。

6.5.1 測定方法

測定は、セクターごとの測定と同じくポインティングにより行う。この時、1 組の反射鏡による結像性能を測定したいので、Primary 側の反射鏡 1 枚のみにビームを当る必要がある。今回、望遠鏡には 90 番台に隙間なく連続で反射鏡を挿入したため、隣り合う反射鏡同士を隔てる余裕は、反射鏡の厚み (~170 μ m) のみである。一方、90 番台の反射鏡の動径方向の幅は 620 μ m~650 μ m である。そこで、ビームサイズ を反射鏡の演習方向に 2 mm、動径方向に 600 μ m まで絞り、反射鏡の位置をあらかじめ確認した。その後、 θ_x を回転させ測定するセクターをステージの Y 軸に平行にして、各セクター 10 組の合計 100 組の反射鏡上の点を測定した。



図 6.17: 反射鏡 1 組ごとのポインティングスキャン

衣 0./: Ipair 人 ヤマノ 時の 測 正 余	ŧ	定条	の測	′時(ン	キャ	ス	pair	:	6.7	表
-----------------------------	---	----	----	-----	---	----	---	------	---	-----	---

X線発生装置: ターゲット (エネルギー)	Ti (4.51 keV)
X 線発生装置: 管電圧電値/管電流値	10 kV/50 mA
フィルター	Ti 50 μm
X 線ビームサイズ:Y×Z	$2\text{mm}{ imes}0.6\text{mm}$
各点での露光時間	50 秒

6.5.2 測定結果

測定結果の例として、HRXRT-1のセクター8の反射鏡10組のもの(イメージ、検出器のY軸にイメージを射影したもの、EEF)を載せる。(図 6.18、6.19、6.20)



図 6.18: 反射鏡 1 組のイメージ — 図はセクター 8 のもの。(左) 焦点面でのイメージ、(中)Detector Y 方向への射影イメージ、(右)Encercled Energy Function(EEF)、上から順に 90 番、91 番、92 番、93 番



図 6.19: 反射鏡 1 組のイメージ — 図はセクター 8 のもの。(左) 焦点面でのイメージ、(中)Detector Y 方向への射影イメージ、(右)Encercled Energy Function(EEF)、上から順に 94 番、95 番、96 番、97 番



図 6.20: 反射鏡 1 組のイメージ — 図はセクター 8 のもの。(左) 焦点面でのイメージ、(中)Detector Y 方向への射影イメージ、(右)Encercled Energy Function(EEF)、上から順に 98 番、99 番

6.5.3 1組のイメージの広がり

以上の測定より得られた。EEF から反射鏡の各点での HPD を見積もる。得られた結果については、それぞれ表 6.8、6.9 に、また HRXRT-1 と HRXRT-2 を比較したものを図 6.21、6.22 にまとめる。

	+ D D = 2				<u>,</u> , , , , , , , , , , , , , , , , , ,
亡时待					
<u> </u>	HPD [万用]	HPD [万用]	HPD [万用]	HPD [万用]	HPD [万用]
90	1.51	0.95	3.62	2.54	2.40
91	1.09	0.85	0.61	0.43	0.71
92	1.23	1.30	1.26	1.23	0.57
93	1.02	0.57	2.13	1.12	0.57
94	1.95	0.57	1.12	0.81	0.95
95	1.23	0.40	2.09	1.19	0.61
96	1.89	0.92	2.37	1.54	0.99
97	1.92	0.40	2.82	1.26	0.50
98	0.88	1.02	2.44	1.68	1.75
99	4.58	0.33	2.51	0.71	0.36
	セクター 8	セクター9	セクター 10	セクター 11	セクター 12
反射鏡	セクター 8 HPD [分角]	セクター 9 HPD [分角]	セクター 10 HPD [分角]	セクター 11 HPD [分角]	セクター 12 HPD [分角]
反射鏡 90	セクター 8 HPD [分角] 0.81	セクター9 HPD [分角] 0.33	セクター 10 HPD [分角] 0.33	セクター 11 HPD [分角] 0.33	セクター 12 HPD [分角] 1.47
反射鏡 90 91	セクター 8 HPD [分角] 0.81 0.29	セクター9 HPD [分角] 0.33 0.36	セクター 10 HPD [分角] 0.33 0.50	セクター 11 HPD [分角] 0.33 0.26	セクター 12 HPD [分角] 1.47 0.54
反射鏡 90 91 92	セクター 8 HPD [分角] 0.81 0.29 0.57	セクター9 HPD [分角] 0.33 0.36 0.54	セクター 10 HPD [分角] 0.33 0.50 0.67	セクター 11 HPD [分角] 0.33 0.26 0.67	セクター12 HPD[分角] 1.47 0.54 0.92
反射鏡 90 91 92 93	セクター 8 HPD [分角] 0.81 0.29 0.57 0.54	セクター 9 HPD [分角] 0.33 0.36 0.54 0.54	セクター 10 HPD [分角] 0.33 0.50 0.67 1.23	セクター 11 HPD [分角] 0.33 0.26 0.67 1.19	セクター 12 HPD [分角] 1.47 0.54 0.92 0.78
反射鏡 90 91 92 93 94	セクター 8 HPD [分角] 0.81 0.29 0.57 0.54 0.61	セクター9 HPD [分角] 0.33 0.36 0.54 0.54 1.78	セクター 10 HPD [分角] 0.33 0.50 0.67 1.23 1.02	セクター 11 HPD [分角] 0.33 0.26 0.67 1.19 0.40	セクター12 HPD[分角] 1.47 0.54 0.92 0.78 1.40
反射鏡 90 91 92 93 94 95	セクター 8 HPD [分角] 0.81 0.29 0.57 0.54 0.61 0.43	セクター 9 HPD [分角] 0.33 0.36 0.54 0.54 1.78 0.54	セクター 10 HPD [分角] 0.33 0.50 0.67 1.23 1.02 1.02	セクター 11 HPD [分角] 0.33 0.26 0.67 1.19 0.40 1.09	セクター 12 HPD [分角] 1.47 0.54 0.92 0.78 1.40 1.89
反射鏡 90 91 92 93 94 95 96	セクター 8 HPD [分角] 0.81 0.29 0.57 0.54 0.61 0.43 0.78	セクター9 HPD [分角] 0.33 0.36 0.54 0.54 1.78 0.54 0.54	セクター 10 HPD [分角] 0.33 0.50 0.67 1.23 1.02 1.02 1.02 0.64	セクター 11 HPD [分角] 0.33 0.26 0.67 1.19 0.40 1.09 1.09	セクター12 HPD[分角] 1.47 0.54 0.92 0.78 1.40 1.89 2.13
反射鏡 90 91 92 93 94 95 96 97	セクター 8 HPD [分角] 0.81 0.29 0.57 0.54 0.61 0.43 0.78 0.61	セクター 9 HPD [分角] 0.33 0.36 0.54 0.54 1.78 0.54 0.54 0.54 1.12	セクター 10 HPD [分角] 0.33 0.50 0.67 1.23 1.02 1.02 0.64 1.75	セクター 11 HPD [分角] 0.33 0.26 0.67 1.19 0.40 1.09 1.09 0.74	セクター 12 HPD [分角] 1.47 0.54 0.92 0.78 1.40 1.89 2.13 0.61
反射鏡 90 91 92 93 94 95 96 97 98	セクター 8 HPD [分角] 0.81 0.29 0.57 0.54 0.61 0.43 0.78 0.61 1.51	セクター9 HPD [分角] 0.33 0.36 0.54 0.54 1.78 0.54 0.54 0.54 1.12 1.19	セクター 10 HPD [分角] 0.33 0.50 0.67 1.23 1.02 1.02 0.64 1.75 2.16	セクター 11 HPD [分角] 0.33 0.26 0.67 1.19 0.40 1.09 1.09 0.74 1.68	セクター12 HPD[分角] 1.47 0.54 0.92 0.78 1.40 1.89 2.13 0.61 4.79

表 6.8: HRXRT-1の反射鏡 1 組ごとのイメージの広がり

平均=1.22 [分角]

97

98

99

0.50

2.27

0.71

1.51

4.79

5.21

0.74

0.74

0.78

	衣 0.9: HK	XRI-2 の反射	現1組ことの1	メーンの広か	<u>י</u>
	セクター 3	セクター4	セクター5	セクター6	セクター7
反射鏡	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]
90	1.33	1.68	3.37	2.09	2.20
91	1.19	0.61	0.40	0.33	0.74
92	1.40	1.37	1.12	1.26	0.50
93	1.16	0.50	1.23	0.95	0.71
94	1.47	0.47	1.09	1.06	1.06
95	0.71	0.81	1.71	0.99	0.43
96	2.40	0.64	2.30	1.30	1.16
97	2.34	0.33	2.34	1.16	0.64
98	2.30	1.23	2.79	1.33	1.78
99	4.48	0.40	2.34	0.92	0.29
	セクター8	セクター9	セクター 10	セクター 11	セクター 12
反射鏡	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]	HPD [分角]
90	0.74	0.40	0.43	0.67	1.99
91	0.33	0.47	0.71	0.33	1.37
92	0.57	0.71	0.40	0.71	1.40
93	0.50	0.57	1.37	1.19	1.71
94	0.43	1.95	1.30	0.50	2.44
95	0.43	0.54	2.02	0.47	2.75
96	0.71	0.54	1.16	1.23	3.34

表 6.9: HRXRT-2 の反射鏡 1 組ごとのイメージの広がり

平均=1.30 [分角]

2.09

1.71

2.16

1.23

0.85

2.37



図 6.21: HRXRT-1 と HRXRT-2 のイメージの広がりのセクター依存性の比較-左上から反射鏡 90 番、91 番、 92 番、93 番、94 番、95 番、96 番、97 番



図 6.22: HRXRT-1 と HRXRT-2 のイメージの広がりのセクター依存性の比較-左上から反射鏡 98番、99番

J: HKA	КІ-ІСП	RARI-2 の反射現こと	. <u>のイメーシの</u> ル	21
		HRXRT-1	HRXRT-2	
	反射鏡	広がり HPD [分角]	HPD [分角]	
	90	1.43	1.49	
	91	0.56	0.65	
	92	0.90	0.94	
	93	0.97	0.99	
	94	1.06	1.18	
	95	1.05	1.09	
	96	1.29	1.48	
	97	1.17	1.29	
	98	1.91	1.98	
	99	1.88	1.97	
	平均	1.22	1.30	

表 6.10: HRXRT-1 と HRXRT-2 の反射鏡ごとのイメージの広がりの平均



図 6.23: HRXRT-1 と HRXRT-2 の反射鏡ごとのイメージの広がりの平均

結果を見ると、反射鏡1組の像の広がりは溝幅を調整する前後でほとんど変化していないと言える。 これは、マイクロメーターによる溝幅の調整により形状を歪めずに溝の幅を詰めることができた結果だ と考えられる。

今回製作した反射鏡の形状については後に議論する。

6.5.4 1組のイメージの結像位置のばらつき

次に、反射鏡1組ごとのイメージの結像位置のばらつきの評価を行う。測定は望遠鏡を回転させて対象となるセクターを水平(ステージのY軸に平行にして)にして行ったため、得られたイメージから反射鏡1組の各セクター内でのステージY方向の相対的な位置情報を得ることができる。また、今回測定した反射鏡の1組は全て90番台で、それぞれのセクターイメージに占める重みはほぼ同じであると考えられるので、得られた結像位置の各セクターでの平均はそのセクターイメージの結像位置と考えることができる。表6.11、6.12にはそれぞれのセクターでの反射鏡10組の結像位置の平均を基準とした、相対的な結像位置を示す。セクター内での反射鏡個々の結像位置のばらつきは、分散を用いて行う。

表 6.11: HRXRT-1 の反射鏡 1 組ごとのイメージの結像位置 — Dy=0 は、そのセクターでの反射鏡 10 組の結像位置 の平均値。

	セクター3	セクター4	セクター5	セクター6	セクター 7
反射鏡	ΔD _y [分角]	ΔD _y [分角]	∆D _y [分角]	ΔD _y [分角]	ΔD _y [分角]
90	-1.56	-1.66	-0.72	-0.36	0.15
91	0.38	-0.11	-0.23	0.24	0.14
92	1.17	0.43	0.20	0.01	0.25
93	-0.34	-0.67	-1.06	-0.87	-0.82
94	-0.46	1.05	1.99	2.76	2.42
95	0.68	-0.09	-0.14	-0.42	-0.94
96	0.20	-0.29	0.35	0.47	-0.09
97	0.82	0.54	0.10	-0.20	0.28
98	0.46	0.32	-0.43	-0.76	-0.69
99	-1.33	0.49	-0.05	-0.87	-0.69
セクターごとの分散	0.87	0.72	0.78	1.02	0.90

	セクター8	セクター9	セクター10	セクター 11	セクター 12
反射鏡	ΔD _y [分角]				
90	-1.07	-1.02	-0.97	-0.48	0.69
91	-0.11	0.07	0.26	0.04	-0.11
92	-0.32	-0.66	-0.11	0.99	1.08
93	-0.74	-0.32	0.55	0.91	0.49
94	2.36	1.93	1.16	0.46	-0.53
95	-1.15	-1.02	-0.30	-0.31	-0.23
96	-0.47	-0.33	0.28	0.00	0.38
97	1.40	1.96	1.54	0.39	-0.20
98	0.13	-0.18	-0.13	-1.44	-0.94
99	-0.05	-0.42	-2.29	-0.56	-0.62
セクターごとの分散	1.04	1.01	1.03	0.69	0.61

全体での分散 = 0.88[分角]

表 6.12: HRXRT-2 の反射鏡 1 組ごとのイメージの結像位置 — Dy=0 は、そのセクターでの反射鏡 10 組の結像位置 の平均値。

	セクター3	セクター4	セクター5	セクター6	セクター 7
反射鏡	∆D _y [分角]	ΔD _y [分角]	∆D _y [分角]	ΔD _y [分角]	ΔD _y [分角]
90	-1.52	-1.43	-0.79	-0.16	0.61
91	0.21	0.16	0.29	0.33	0.19
92	0.64	-0.27	-0.30	-0.02	0.58
93	-0.35	-0.13	-0.16	-0.46	-0.70
94	-0.46	0.23	0.15	0.75	0.44
95	0.57	0.24	0.06	-0.03	0.00
96	0.25	0.17	0.43	0.26	0.02
97	0.30	0.63	0.76	0.45	0.33
98	0.45	0.22	-0.36	-0.48	-0.70
99	-0.08	0.17	-0.09	-0.65	-0.79
セクターごと分散	0.61	0.53	0.42	0.43	0.51

	セクター8	セクター9	セクター10	セクター 11	セクター 12
反射鏡	ΔD _y [分角]				
90	-0.54	-0.75	-0.27	0.21	1.01
91	0.00	-0.27	-0.29	-0.19	-0.02
92	0.61	0.33	0.64	1.06	0.88
93	-0.51	-0.29	0.17	0.07	-0.13
94	0.65	0.80	0.77	0.44	-0.34
95	0.38	0.05	0.26	-0.10	0.22
96	-0.01	0.06	0.40	-0.37	-0.27
97	0.91	1.36	1.06	0.28	-0.12
98	-0.82	-0.53	-0.21	-0.60	-0.19
99	-0.66	-0.77	-2.55	-0.80	-1.04
セクターごとの分散	0.58	0.65	0.95	0.51	0.57

全体での分散 = 0.59[分角]



図 6.24: HRXRT-1 と HRXRT-2 の各セクターの分散の変化



図 6.25: 反射鏡1組ごとの結像位置のばらつき

図 6.24 は、HRXRT-1 と HRXRT-2 について、それぞれのセクターでの分散を表した図である。これを 見ると位置のばらつきはほとんどのセクターにおいて改善されていることがわかる。また、図 6.25 はセ クターの結像位置から反射鏡 1 組の結像位置のばらつきをすべてのセクターで足し合わせたヒストグラ ムである。この結果を見ると、溝を積める前に広がっていたセクター何での結像位置が溝の調整によっ てかなり改善されているのが分かる。セクターイメージの結像位置である。原点を中心にして分散を見 積もると、0.88 分角から 0.59 分角に改善されている。HRXRT-1 については溝の遊びが ~35µm とかな りあるため、セクター内での反射鏡個々の傾きがばらついてしまい結像位置のばらつきを生じていると 考えられる。

6.6 結像性能の内訳

測定により得られた結果から、Quadrantの結像性能を決める位置決め誤差、形状誤差、円錐近似を見 積もる。

6.6.1 円錐近似と形状誤差の分離

6.3 で述べたように反射鏡 1 組ごとのイメージの広がり (HPD) は円錐近似と形状誤差の 2 乗和で表される。この性質を用いて、形状誤差と円錐近似の分離を行う。形状誤差を HPD_{形状}、円錐近似を HPD_{円錐}、1 組ごとのイメージの広がりを HPD_{1 組}とすると、形状誤差は、

$$HPD_{$$
形状} = $\sqrt{HPD_{1\,\mathrm{\pounds}}^{2} - HPD_{$ 円錐}^{2}}

と表すことができる。また、3.1.1 で述べたように、HPD_{円錐}は0.3 分角である。この計算式を用いて 求めた形状誤差を、表 6.13 に示す。

	表 6.13: HRXRT-1、2 の形状誤差	
	1 組ごとのイメージの広がり (HPD) [分角]	形状誤差 [分角]
HRXRT-1	1.22	1.18
HRXRT-2	1.30	1.26

これらの結果を見ると、形状誤差は、調整の前後でほとんど変化していないと言える。 同様にして、HRXRT-1 について各反射鏡の1組のイメージの前セクターでの平均からそれぞれの形状 誤差を見積もる。

反射鏡	1 組ごとのイメージの広がり (HPD) [分角]	形状誤差 [分角]	
90	1.43	1.40	
91	0.56	0.48	
92	0.90	0.84	
93	0.97	0.92	
94	1.06	1.02	
95	1.05	1.00	
96	1.29	1.25	
97	1.17	1.13	
98	1.91	1.89	
99	1.88	1.86	

表 6.14: HRXRT-1 の反射鏡各1組の形状誤差

6.6.2 位置決め誤差の分離

位置決め誤差は、セクターイメージの結像位置のばらつきと1組ごとのイメージの結像位置のばらつ きの2乗和で表される。それぞれのばらつきがガウス分布に従うとすると、全点の50%が入る円の直径 HPD_{ばらつき}は、分散 σ を用いて、1.34 σ と書くことができる。これの 2 乗和を用いて位置決め誤差を求める。その計算結果については表 6.15 に示す。

	セクターイメージの	反射鏡1組ごとのイメージの	位置決め誤差
	ばらつき (HPD) [分角]	ばらつき (HPD) [分角]	[分角]
HRXRT-1	0.39	1.18	1.24
HRXRT-2	0.42	0.80	0.90

表 6.15: HRXRT-1、2 の位置決め誤差

6.7 結果のまとめと考察

今回の測定において、望遠鏡としての結像性能はすざくの結像性能を上回ることができた。これはア ライメントプレートの導入と、マイクロメーターによる調整によりアライメントプレートの望遠鏡内で の位置を設計値に対して±10µmの精度で合わせることができたためだと考えられる。また、同時に溝 の幅を詰めることにより、反射鏡の形状を歪めることなく位置決めを向上させることに成功した。



図 6.26: Quadrant 結像位置まわりの1組のイメージの分布—(左)HRXRT-1、(右)HRXRT-2。

図 6.26 は反射鏡 1 組ごとの結像位置を測定時の回転を考慮して、セクターの結像位置の周りに、平行 移動させることによりプロットした図である。今回反射鏡を 10 組挿入し、10 セクターについて測定を 行ったため、結像位置は 100 点ある。この図を見ると、1 組の反射鏡の結像位置が HRXRT-1 に比べて HRXRT-2 において Quadrant の結像位置の周りに収まっていく様子がわかる。

今回、マイクロメーターにより反射鏡の溝内での遊びを詰めることによりばたつきを押さえることが できた。しかし、目標としていた位置決め誤差は 2006 年大熊修論の 0.59 分角を切ることだったが、それ を達成することはできなかった。目標を達成できなかった原因として、反射鏡の膜厚のムラが考えられ る。今回、反射鏡はレプリカ法を用いて、反射鏡としての厚さを 170 μ m を目標に製作した。しかし、測 定後に反射鏡を抜いて厚さをマイクロメーターで測定したところ、反射鏡は設計の 170 μ m に対して、お よそ $\pm 7\mu$ m 程度の範囲で厚さにムラがあることが分かった。また中には設計値から大きく離れて 185 μ m 程度もの厚さがあるものがあった。この反射鏡はSecondaryに入っていたことから、アライメントプレートの下側を調整する際に、抵抗を生む結果になった。

反射鏡の厚さムラにより、反射鏡は場所によっては遊びが10µm以上残り結像位置のばらつきを生じ させてしまったものと考えられる。また今回溝幅を詰めた後にハウジングを動かしたところ、反射鏡が まだ動くだけの余裕があることがわかった。まだ形状を歪める傾向が出ていないことから、さらに溝幅 を詰める余地はあったと考えられる。しかし、さらに溝幅を詰める上で重要になってくるのはやはり厚 さのムラである。厚い反射鏡が望遠鏡に入っていたならば、その厚さが溝幅を詰めることができる限界 になってしまう。また、同時に厚い反射鏡が存在することで、その反射鏡にストレスをかけ、形状の歪 みも生じてくる結果になる。今後、位置決めを向上させるためには、さらに溝の幅を詰め形状を歪まな い限界を知るとともに反射鏡の厚さムラをなくすことで、形状を歪めず溝幅を詰めれる範囲を増やすこ とが重要になる。



図 6.27: HRXRT-1、2 の結像性能決定要因の内訳-(左)HRXRT-1、(右)HRXRT-2。

図 6.27 は Quadrant 全体の結像性能の内訳をまとめた図である。今回は、初めて宇宙科学研究本部に おいて試作した反射鏡を 10 組挿入して、望遠鏡を組むことができた。その形状は平均で 1.2 分角程度で すざくの 0.85 分角にはまだ及んでいない。しかし、表 6.26 を見ると、反射鏡個々においては 0.48 分角 とすざくの反射鏡のレベル以上のものもできている。HRXRT-2 の結果を見ると、結像性能の劣化要因で 最も大きな要因となっているのは反射鏡の形状誤差である。先に述べた、反射鏡の厚さムラの改善と同 時に、形状のよい反射鏡を多く製作して、更なる形状誤差の改善を試みる必要がある。

92

第7章 まとめと今後の展望

今回我々が行った、結像性能の向上を目指した反射鏡作りと新しい調整機構の導入により、研究で得られた結果と今後の課題について示す。

7.1 まとめ

 レプリカ法による反射鏡の製作
今回、レプリカ法により反射鏡を製作し、その反射鏡について、ガラスマンドレルおよびアルミ 基板との比較評価した。その結果、熱成型基板の形状をエポキシ樹脂が吸収しガラスマンドレルの形状を反映しているものもできていることがわかった。しかし、まだうまく写し取れていないものが存在することがわかった。この原因は今後追求する。

2. 新しいアラインメントプレートの設計と調整方法の確立

反射鏡の位置決め誤差を形状を悪化させることなく押さえるため、新しいアライメントプレート を設計開発した。同時にその、プレートのハウジング内でのマイクロメーターによる位置調整の 方法を確立した。その結果、反射鏡を望遠鏡ハウジングに搭載した後に、プレートの位置の調整 が可能になるとともに、反射鏡挿入時にあった溝の遊びを調整により詰めることも可能になった。 実際に調整を行った結果、アライメントプレートの位置を設計値の $\pm 10\mu$ mに調整することができ た。また、溝の幅については詰める目標である 25μ mに対して、 $\pm 5\mu$ mの範囲で調整することが できた。

3. 望遠鏡の結像性能の評価

今回、製作した反射鏡 10 組を新しいアライメントを用いた望遠鏡ハウジングに組み入れ、X 線で その性能を評価した。その結果は、溝幅を詰める前は望遠鏡の結像性能が全体で 1.75 分角で、そ の決定要因は形状誤差が 1.18 分角、位置決め誤差が 1.24 分角であった。またこの望遠鏡について、 厚さ 0.5 μ m のアライメントプレートを再調整し溝幅を ~25 μ m 詰めたところ、望遠鏡全体で結像 性能は 1.47 分角と結像性能の向上が見られた。さらにその要因を調べたところ、形状誤差が 1.26 分角で位置決め誤差が 0.90 分角と言うことがわかり。形状を歪めずに位置決めを減らす当初の目 標は達成できた。しかし、結像性能の改善は 0.90 分角に留まり、目標としていた 0.59 分角を超え ることはできなかった。また、形状誤差は ~1.2 分角と、全体としてはまだざくの性能には 及ん でいないが、反射鏡によってはすざくの性能を上回る 0.5 分角を切るものができていることがわ

7.2 今後の展望

1. 反射鏡の厚さムラの除去

今回測定後に反射鏡の厚さが目標の170µmに対して±7µm程度あることがわかった。この厚さム ラが溝幅を圧縮する限界となり形状を歪めずに溝を詰めるリミットになってしまう。今後の課題と して厚さムラをなくし全ての反射鏡において十分に溝の遊びを詰めれるようにすることが必要で ある。具体的な方法としては、レプリカにおける圧着方法を改善し、エポキシが一様に広がるよ うにする。または、望遠鏡ハウジングに挿入前に厚さの確認を行い、極端に厚いものを除去する などの工夫が必要であると考えられる。

2. 反射鏡の製作方法の改良

厚さムラをなくすのが困難であれば、反射鏡の製作方法を変えてみるという手法もある。具体的 に説明すると、アルミ基板の厚さは設計の150µmに対して±1µmの精度で製作されている。この ムラのない厚さに着目し、反射鏡のアライメントプレートの溝で支持している端の部分をエポキ シ噴霧時にテープなどでマスクすることで反射膜を写し取らずにアルミ基板のまま残すと言う手 法である。この方法により有効面積は減るが、位置決めによる結像性能の改善が見込まれる。

3. 反射鏡の鏡面形状の改善

今回、最終的に得られた望遠鏡の結像性能は反射鏡の形状誤差が結像性能劣化の最大要因となった、しかし、反射鏡を個別に見ていくと、ガラスマンドレルの形状を写し取ることができていて、 X線での結像性能も0.5分角を超えるものができている。今後ガラスマンドレルの形状を写し取れ ない原因を追求し恒常的にガラスマンドレルの形状を写し取った、形状のよい反射鏡を作れるようになる必要がある。

4. 調整可能限界の測定

今回溝幅を詰めることで、結像性能の改善を試みることができた、しかしその改善は0.90分角に 留まり、昨年の0.59分角に及ばなかった。この原因としては、ほとんどの反射鏡にとっての溝の 遊びがまだ残っていたこととが挙げられる。この25µmの調整では、形状に対して悪影響を及ぼ していないことから、まだ、調整により溝の遊びを詰める余地はあると考えられる。今後、この形 状に影響を与えない溝幅の圧縮の限界を探ることで、このマイクロメーターを用いた調整機構の 利点を十分に生かすことができると考えられる。

付 録 A 実験装置

本論文作成に当たり、使用した実験装置について、説明する。

A.1 非接触 3 次元形状測定装置 (NH-5N、NH3-NS)

三鷹光器株式会社にある非接触3次元形状測定装置 NH-5N と宇宙科学研究所所有の NH3-NS の測定 原理とシステム図を図 A.1 に示す。



図 A.1: NH シリーズの測定原理とシステム図

顕微鏡鏡筒に送り込まれたレーザー光は、対物レンズを通って光軸中心の焦点面に向かって進む。サ ンプル表面で反射されたあと再び対物レンズを通過して AF センサー部に結像する。フォーカスが外れ ている時は、レーザーの結像位置が変化するので、この変化をセンサーが捉えて AF 駆動機構を用いて 対物レンズをフォーカスポイントへ移動させる。このオートフォーカスの仕組みによって高さ測定をし ながら、自動 XY ステージで試料面をスキャニングして、表面の3次元形状を定量的に調べることがで きる。

NH-3NSとNH-5Nの違いはステージ部のストロークにあり、顕微鏡部、オートフォーカス部に関して

は NH シリーズを通して共通である。表 A.1 に NH-3NS 及び NH-5N のスペックを示す。

仕様	NH-3NS	NH-5N	
顕微鏡部 (各モデル共通)			
観察光学系	無限遠鏡筒 (f = 100 mm)		
対物レンズ	$10 \times (NA = 0.25, WD = 7.0 mm)$	$0.50 \times (NA = 0.55, WD = 8.1mm)$	
CCD カメラ	40 万画素カラー CCD		
オートフォーカス部	¥ (各モデル共通)		
可動範囲	10 mm		
分解能	0.001 μm		
測定精度	$\pm 0.1 + 0.3L/10\mu m$		
測定再現性	再現性 σ=0.01μm		
使用レーザー	半導体レーザー (波長 635nm)		
フォーカスエリア	100 倍 : ~1µm 50 倍 : ~2µm 2	20 倍:~4µm	
ステージ部			
可動範囲			
Х	200 mm	300 mm	
Y	150 mm	400 mm	
Z	120 mm	170 mm	
分解能			
Χ, Υ	0.01 μm	0.1 μm	
Ζ	0.1 μm	0.1 μm	
専用防振台	エアーゴム式防振台		

表 A.1: 三鷹光器製非接触3次元測定装置 NH シリーズのスペック

A.1.1 エッジ検出測定

エッジ検出測定の概略を説明する(図 A.2 参照)。まずエッジを跨るように2点を指定する。次にそこから離れたもう1点を指定する。ここでステージの移動ピッチとエッジと認識するためのしきい値 ΔZ を入力する。まず(1)-(2)方向へスキャンを行ない、しきい値を越えた点の座標値(x,y)を返す。次に(3) に移り、(1)-(2)方向と平行になるようにスキャンを行なう。ここでも先ほどと同様にしきい値を元にしてエッジを検出し、その座標値を返す。ただしサンプリング回数を設定しておけば、(1)-(3)の間をその回数分だけ分割してエッジ検出を行なう。

ただし、エッジ検出では、しきい値の設定がエッジ検出位置に影響する。今回、同じ点を色々なしき い値でエッジ検出してみたところ、しきい値 ≥~ 5µm では、検出位置が一定となった。これより、しき い値として 5µm という値を用いることにした。



図 A.2: エッジ検出機構の概略

A.2 X線測定システム

望遠鏡の性能評価は、宇宙科学研究所の 30m ビームラインを用いて行なった。その測定システムおよび検出器について説明する。宇宙研標準X線光源室における平行X線光源装置を図A.3 に示す。



図 A.3: 宇宙研標準 X 線光源室に設置された 30m ビームラインの全体図

最大定格出力	60kV 200mA (12kW)
管電圧設定	$5\sim 60 \mathrm{kV}$
管電流設定	$10\sim 200~mA$
ターゲット回転数	6000 rpm
X 線源サイズ	$0.5(Z) \times 10(Y) \text{ mm}^2$
実効焦点サイズ	$0.5(Z) \times 1.0(Y) \text{ mm}^2$
X 線ビーム強度の安定性	< 3% (立ち上げから1時間後)

表 A.2:	X 線発生装置	の什様
--------	---------	-----

A.2.1 X 線発生装置

宇宙研標準 X 線光源室に設置されている X 線発生装置は、水冷式回転対陰極型の理学電機製ロータフレックス (RU-200) である。X 線発生の原理は次のようになっている (図 A.4)。まず陽極であるフィラメントを加熱することによって熱電子を発生させる。この熱電子は、回転する陰極ターゲットとの間にかけられた管電圧によって加速され、ターゲットに衝突する。この時制動放射のメカニズムによって電子の受けた加速度と垂直方向に電磁波が発生する。管電圧は [kV] のオーダーなので、発生する電磁波は X線領域が主となる。一方でターゲットに蒸着された金属の内殻電子を弾き飛ばしもするので、外殻電子のエネルギー準位との差にしたがった特性 X 線も発生する。宇宙研標準 X 線光源室での測定に用いるターゲット物質としては、C-K α (0.282[keV])、Al-K α (1.49[keV])、Ti-K α (4.51[keV])、Cu-K α (8.04[keV])、Pt-L(9.44[keV]) の 5 種類である。照射された熱電子のターゲット上でのスポットサイズは 10mm×1.0mmであるが、X 線の出射方向 (X 軸) に対してターゲットの回転軸は 6 °傾けて取り付けられているために、下流側から見込むビームの実効焦点サイズは 1.0mm×1.0mm になる。また X 線ビームの強度とエネルギー領域は、フィラメント電流と管電圧を調整することで制御している。X 線発生装置の仕様を表 A.2 に示す。



図 A.4: X 線発生装置の構成図

A.2.2 四極スリット

X線望遠鏡の特性測定においてはできるだけ高い平行度のX線を当てる必要がある。そのために、X線発生装置から30mの長い距離をとり、四極スリットでビームを細く絞って使うことで、15秒角(2mスリット使用時)という高い平行度を実現している。スリットの中心位置、Y及びZ方向の間隔は、ワークステーションから直接制御可能で、それぞれを独立に動かすことができる。



図 A.5: 四極スリットの構成図

A.2.3 大気室チェンバー

X線発生装置からのX線は、前述したように特性X線と制動放射による連続X線からなるが、X線の正反射及び散乱成分は強いエネルギー依存性を持っているために、測定にはできる限り単色なX線を用いる方が良い。このために大気室チェンバーには数種類のフィルタが入っており、目的とする特性X線以外のエネルギーの連続X線をフィルタで取り除くことによって単色化を行なっている。フィルタの構成を図A.6に示す。

● 透過型フィルタ

透過型フィルタは物質の吸収端における吸収係数の急激な変化を利用した、最も簡単な分光素子 である。各フィルタのK吸収端が、目的とする特性K-X線のエネルギーのすぐ上に来ていること を利用して、特性X線より高エネルギー側の連続X線を取り除くことができる。しかし低エネル ギー側の連続X線及びKβ線は除去することができない。



図 A.6: 大気室チェンバー中のフィルタの配置図— X線発生装置側から検出器チェンバー側を見た時の様子(上)、上 (+Z 方向)から見た様子(下)。

XRTの測定に用いられる特性 X 線とその時に使うフィルタの種類を表 A.3 に示す。また各フィルタの透過率を図 A.7 に示す。

表 A.3: 特性 X 線と対応するフィルタの種類

特性X線	フィルタ物質	フィルタの厚さ[mum]
Al-K α (1.49keV)	Al	15
Ti-K α (4.51keV)	Ti	50
Cu-K α (8.04keV)	Ni	40
Pt-L(9.44keV)	Ni	40



Filter Transmissin

図 A.7: フィルタの透過率

表 A.4: 試料室・検出器両チェンバー内のステージ群の可動範囲 (遠藤 1998)

斬	ŧ	移動量	移動可動範囲	移動速度
	[]	pulse/deg or min]	[mm,arcmin](total)	[mm,arcmin/sec]
S-	Х	—	0 or +25(手動)	—
S-	Y	100 pulse / 1mm	$\text{-206.5} \sim \text{+426.6} \ \text{(633.1)}$	4
S-	Z	800 pulse / 1mm	$-192.6 \sim +228.8 \; (421.4)$	0.25
S-	θ_x 1	1000 pulse / 1deg	(±360° 回転が可能)	20
S-	θ_y 2	2000 pulse / 1deg	$-331.8 \sim +292.9~(624.7)$	20
S-	θ_z 2	2000 pulse / 1deg	$-250.0 \sim +284.4 (534.4)$	20
検出器チェンバー				
	軸	移動量	移動可動範囲	移動速度
		[pulse/mm]	[mm](total)	[mm/sec]
	D-X	2000 pulse / 1m	m $-111.5 \sim +97.3$ (208.8) 1.5
	D-Y	2000 pulse / 1m	m $-231.0 \sim +429.7 (660.7)$	7) 4
	D-Z	2000 pulse / 1m	m $-207.5 \sim +213.0 (420.5)$	5) 0.25

試料室チェンバー

A.2.4 試料室チェンバー、検出器チェンバー及び駆動ステージ

地上較正試験においては、平行度の高いX線ペンシルビームを望遠鏡全体に照射する必要がある。しかし前述のX線発生装置は固定されているために、逆にXRTと検出器を並進及び回転ステージに載せて移動することで、ペンシルビームによる全面スキャンを実現している。試料室チェンバーと検出器チェンバーに設置されている、計10軸の駆動ステージ群の全体図及び可動範囲について図A.8と表A.4に示す。



図 A.8: 試料室および検出器チェンバーの駆動ステージ全体図 (柴田 1997) — 左が試料室チェンバー内ステージ群で右が検出器チェンバー内ステージ群。

ペンシルビームを XRT に照射する位置を変えるために、試料室チェンバーのステージは Y、Z 軸方向 に移動可能である。また XRT-I(焦点距離 4750[mm]) と XRT-S(焦点距離 4500[mm]) という焦点距離の異 なる望遠鏡の測定のために、X 軸方向に関しても移動が可能である。さらに XRT の結像性能及び有効面 積の入射角依存性を調べるために、X 線の入射角度を変える必要があるので、 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 方向に回転可
能なステージが、並進ステージの上に載っている。これら2つのステージの組み合わせによって、任意の位置と角度にXRTを移動、回転させることができる。

また XRT の全面スキャンや1 ラインスキャンにおいては、検出器を XRT の焦点位置に固定する必要 があるため、検出器も X、Y、Z 軸方向に移動可能な並進ステージの上に載せてある。測定の際には S-y と D-y を同期して動かさなくてはいけないが、±0.1mm 程度の精度で両者を一致させて動かすことが可 能になっている (柴田 1997)。これら 10 軸の駆動ステージ群は、試料室チェンバーの X 軸を除いて全て ワークステーションによって制御することが可能になっている。

座標軸は以下のように定義されている。X線の上流(X線発生装置側)から下流(検出器チェンバー側) 方向にX軸、地面から鉛直方向上向きにZ軸を定義する。右手系を採用するために、Y軸方向は上流か ら下流側を見て、水平方向に右から左に向かう向きになる。回転系については右ねじが進む向きに回転 させる方向を正の向きと定義する(図A.8)。

A.2.5 真空装置

宇宙研標準 X 線光源室に設置されたビームラインの長さは、高い平行度を実現するために 36[m] にも およぶ。しかし地上較正試験時に使用される X 線領域 (~10[keV]) では、大気中の分子による吸収や散 乱のために X 線は大気中をこれほどの距離を進むことができない。そこで X 線の進むダクトを真空に引 いて、大気分子による吸収を防いでいる。ビームライン全系に、ロータリーポンプとターボ分子ポンプ の組が9組設置されており、ゲートバルブによって分けられた 6 つのエリアを真空に引く。ロータリー ポンプは大気圧から ~ 10⁻¹[Torr] 程度までの低真空を粗引きし、10⁻¹[Torr] 以上の高真空では、ターボ 分子ポンプと背圧用補助ポンプとしてロータリーポンプを同時に使用して真空引きを行なっている。

これらの真空度はピラニゲージ (測定範囲:7.6×10² ~ 1.0×10⁻³ [Torr]) と、イオンゲージ (測定範囲:1.0×10⁻¹ ~ 1.0×10⁻⁷ [Torr]) でモニターしており、通常大気圧 ~ 10⁻³[Torr] まではピラニゲージ、10⁻³ ~ 10⁻⁷[Torr] まではイオンゲージを使用している。

図 A.9 に宇宙研標準 X 線光源室に設置されている真空・排気装置の全体図を示す。

104



図 A.9: ビームラインにおける真空・排気装置の全体図



図 A.10: 検出器チェンバー内に設置されている検出器 — 左 (+Dy 側) から順に CaZdTe 検出器、背面照射型 CCD、 P.C.。

A.2.6 焦点面検出器

検出器チェンバーのステージには、焦点面検出器として以下のものが搭載されている。図 A.10 に焦点 面検出器の配置を示す。

• ガスフロー型比例計数管 (P.C.)

宇宙研標準 X 線光源室で使われている比例計数管はガスフロー型であり、P10 ガス (Ar: 90%、 CH₄:10%)を大気圧で使用する。比例計数管は位置撮像能力はないが、分光測定が可能である。表 A.5 に比例計数管の仕様をまとめる。

背面照射型 CCD カメラ

CCD とは Carge Coupled Device(電荷結合素子)の略であり、本来は電荷を移動させるためのデバイス を意味する。現在宇宙研標準 X 線光源室には浜松ホトニクス製背面照射型 X 線 CCD カメラシステムが 設置されている。この CCD カメラは受光領域と電荷転送部が同じフルフレーム転送方式である。一辺 24µm の正方形ピクセル 1024×1024 個からなっていて、XRT に対して 19×19[arcmin²]の立体角をカバー している。CCD は 1.1[arcsec]の位置分解能をもった撮像能力があるために、サンプルのアラインメント やサンプルからの反射 X 線の Specular 位置を確認するのに使われる。また暗電流を減らすために、ペル チェ素子を使って-70C°まで冷却して使用する。

図 A.11 に前面照射型と背面照射型 CCD の断面図及び電荷転送方式の概念図を示す。また表 A.6 に X線 CCD カメラの仕様をまとめる。

使用ガス	P10 ガス (Ar:90%、CH ₄ :10%) 大気圧で使用
ガス深さ	20 mm
X 線入射窓	厚さ 1 μm ポリプロピレン + カーボンダグ
	直径 12.0 mm
陽極芯線	直径 50 μm タングステン
印化電圧	2100 V (C-Ka の場合のみ 2200 V)
エネルギー範囲	~12.3 keV (検出効率 10%以上)
エネルギー分解能	\sim 45% (Al:1.49keV)
	$\sim 30\%$ (Ti:4.51keV)
	$\sim 20\%$ (Cu:8.04keV)
線形増幅器の増幅率設定	Al : 100 \times 0.5, Ti : 50 \times 0.5, Cu : 50 \times 0.5

表 A.5: ガスフロー型比例計数管の仕様









P3 P2 P1 t₁ t₂ t₃ Time

図 A.11: 背面照射型 CCD カメラの原理 – 前面照射型と背面照射型の断面図 (上)、電荷転送の概念図 (下)。

表 A.6: 背面照射型 CCD カメラの仕様

撮像素子	フルフレーム転送方式 MOS 型 CCD 固体撮像素子
有効画素数	$1024(H) \times 1024(V)$
画素サイズ	$24 \mu \mathrm{m} imes 24 \mu \mathrm{m}$
有効面積	24.6mm \times 24.6mm (1 inch size)
フレームレイト	2 秒/フレーム (高性能読み出しモード)
飽和電荷量	20000 electrons (高性能読み出しモード)
エネルギー範囲	$1.1 \sim 9.2 [\text{keV}]$
読み出しノイズ	
平均暗電流	
冷却方式	電子冷却 + 水冷

付 録 B 望遠鏡ハウジング、調整治具、アライメント プレートの製作図面

三鷹光器株式会社、(株)オオイシにそれぞれ製作していただいた、望遠鏡ハウジング、アラインメント プレートの製作図面を以下に載せる。



組み上げ図







Bottom		13xM3深さ10(C)		基準線からの	角度	
		R207.18	#	A	В	С
		- 13xM2.6深さ10(F	3) 1	9.025	8.963	11.066
			2	15.453	15.391	17.494
		R209.20	3	21.882	21.820	23.923
			4	28.310	28.248	30.352
12-142 (四十10(4)		<i>;</i>	5	34.739	34.677	36.780
T3XM2.6深さTU(A)		X	6	41.168	41.106	43.209
R204.21	/ ×		7	47.596	47.534	49.637
		60	8	54.025	53.963	56.066
			9	60.453	60.391	62.494
			10	66.882	66.820	68.923
			11	73.310	73.248	75.352
			12	79.739	79.677	81.780
		- lool	13	86.168	86.106	88.209
			»\			
	基準線 201.5 211.5					
		品名	 ア型	<u>€(2)</u> ルミ		<u>1:2</u> 1

日付

06.7.23

作者

窪田 廉







品名	側板B	縮尺	1:2
材質	アルミ	数量	1
日付	06.7.23	作者	窪田 廉









医	兆兄王 ()	年ころとも		~~~ ●~	いに当りる	/				
反射鏡II	D Primar	y Top	Primary	y Bottom	Primary 傾き θ	Sec	ondary Top	Seconda	ry Bottom	Secondary 傾き $ heta$
<u> </u>	X[mm]	Y[mm])	(X[mm]	, Y[mm])	θ [degree]	(X[mm]	, Υ[mm]) (X[mm]	, Y[mm])	heta [degree]
40 (80.212	102.200)	(79.826	, 10.600)	0.2413713	(79.649	, -10.600) (78.491	, -102.200)	0.7241139
41 (80.814	102.200	(80.425	, 10.600)	0.2431804	(80.246	, -10.600) (79.079	, -102.200)	0.7295412
42 (81.419	102.200	(81.027	, 10.600)	0.2449994	(80.846	, -10.600) (79.671	, -102.200)	0.7349982
43 (82.027	102.200	(81.632	, 10.600)	0.2468282	(81.450	, -10.600) (80.266	, -102.200)	0.7404846
44 (82.638	102.200	(82.240	, 10.600)	0.2486669	(82.057	, -10.600) (80.865	, -102.200)	0.7460007
45 (83.253	102.200	(82.852	, 10.600)	0.2505155	(82.668	, -10.600) (81.466	, -102.200)	0.7515465
46 (83.871	102.200	(83.467	, 10.600)	0.2523741	(83.281	, -10.600) (82.071	, -102.200)	0.7571223
47 (84.492,	102.200	(84.086	, 10.600	0.2542428	(83.898	, -10.600) (82.679	, -102.200)	0.7627284
48 (85.117	102.200	(84.707	, 10.600	0.2561215	(84.519	, -10.600) (83.290	, -102.200)	0.7683645
49 (85.745,	102.200	(85.332	, 10.600)	0.2580104	(85.142	, -10.600) (83.905	, -102.200)	0.7740312
71 (100.456	102.200	(99.973	, 10.600)	0.3022495	(99.750	, -10.600) (98.300	, -102.200)	0.9067485
72 (101.167	102.200	(100.680	, 10.600	0.3043876	(100.456	, -10.600) (98.996	, -102.200)	0.9131628
73 (101.882	102.200	(101.392	, 10.600)	0.3065373	(101.166	, -10.600) (969.66	, -102.200)	0.9196119
74 (102.601	102.200	(102.107	, 10.600)	0.3086987	(101.880	, -10.600) (100.399	, -102.200)	0.9260961
75 (103.323	102.200	(102.826	, 10.600)	0.3108717	(102.598	, -10.600) (101.106	, -102.200)	0.9326151
76 (104.050 ,	102.200	(103.549	, 10.600)	0.3130564	(103.319	, -10.600) (101.817	, -102.200)	0.9391692
) [[104.780	102.200	(104.276	, 10.600)	0.3152529	(104.044	; -10.600) (102.532	, -102.200)	0.9457587
78 (105.515 ,	102.200	(105.007	, 10.600)	0.3174613	(104.774	; -10.600) (103.251	, -102.200)	0.9523839
) 6/	106.253	102.200	(105.742	, 10.600)	0.3196817	(105.507	, -10.600) (103.974	, -102.200)	0.9590451
80 (106.996	102.200	(106.481	, 10.600)	0.3219140	(106.244	10.600) (104.700	, -102.200)	0.9657420

呈速到	说 坐 標	(への)満(0位置(しんど	た点です					
反射鏡ID	Primary	/ Top	Primary	/ Bottom	rimary 傾き θ	Secon	dary Top	Secono	lary Bottom	Secondary 傾き 6
	X[mm] ,	Y[mm])	(X[mm]	, Y[mm]	 θ [degree]	(X[mm]	, Υ[mm])	(X[mm]	, Υ[mm])	heta [degree]
90 (1	114.644	102.200)	(114.093	, 10.600	 0.3449111	(113.839	, -10.600)	(112.185	, -102.200)	1.0347333
91 (1	115.432 ,	102.200)	(114.877	, 10.600	 0.3472797	(114.621	, -10.600)	(112.956	, -102.200)	1.0418391
92 (1	16.224	102.200)	(115.665	, 10.600	 0.3496611	(115.408	, -10.600)	(113.731	, -102.200)	1.0489833
93 (1	117.021	102.200)	(116.458	, 10.600	 0.3520553	(116.199	, -10.600)	(114.510	, -102.200)	1.0561659
94 (1	117.821	102.200)	(117.255	, 10.600	 0.3544624	(116.994	, -10.600)	(115.293	, -102.200)	1.0633872
95 (1	118.626	102.200)	(118.056	, 10.600	 0.3568825	(117.793	, -10.600)	(116.081	, -102.200)	1.0706475
96 (1	119.436	102.200)	(118.861	, 10.600	 0.3593157	(118.597	, -10.600)	(116.873	, -102.200)	1.0779471
97 (1	120.249	102.200)	(119.671	, 10.600	 0.3617621	(119.405	, -10.600)	(117.669	, -102.200)	1.0852863
98 (1	121.067	102.200)	(120.485	, 10.600	 0.3642216	(120.217	, -10.600)	(118.470	, -102.200)	1.0926648
99 (1	121.890 ,	102.200)	(121.304	, 10.600	 0.3666944	(121.034	, -10.600)	(119.275	, -102.200)	1.1000832
150 (1	170.302	102.200)	(169.484	, 10.600	 0.5121988	(169.107	, -10.600)	(166.650	, -102.200)	1.5365964
151 (1	171.391	102.200)	(170.567	, 10.600	 0.5154696	(170.188	, -10.600)	(167.715	, -102.200)	1.5464088
152 (1	172.486 ,	102.200)	(171.656	, 10.600	 0.5187580	(171.275	, -10.600)	(168.786	, -102.200)	1.5562740
153 (1	173.586	102.200)	(172.751	, 10.600	 0.5220642	(172.367	, -10.600)	(169.863	, -102.200)	1.5661926
154 (1	174.692,	102.200)	(173.852	, 10.600	 0.5253881	(173.466	, -10.600)	(170.945	, -102.200)	1.5761643
155 (1	175.805 ,	102.200)	(174.959	, 10.600	 0.5287299	(174.570	, -10.600)	(172.034	, -102.200)	1.5861897
156 (1	176.923	102.200)	(176.072	, 10.600	 0.5320898	(175.681	, -10.600)	(173.128	, -102.200)	1.5962694
157 (1	178.047	102.200)	(177.191	, 10.600	 0.5354677	(176.797	, -10.600)	(174.229	, -102.200)	1.6064031
158 (1	179.178	102.200)	(178.316	, 10.600	 0.5388638	(177.920	, -10.600)	(175.335	, -102.200)	1.6165914
159 (1	180.315 ,	102.200	(179.448	, 10.600	 0.5422782	(179.049	, -10.600)	(176.447	, -102.200)	1.6268346

溝断面の模式図 (R度は全く合っていません。値だけ見てください。)

※数字はすべてµmの単位で 表示しています。















謝辞

本論文を完成させるにあたり、非常に多くの人にお世話になりました。

石田學先生には、宇宙科学研究本部において研究をする機会を与えて頂きました。また、実験および 修論の執筆において多くのことをご指導頂きました。私が実験において行き詰まってしまった時、頂い た助言から研究を進めていくことができたことがしばしばありました。私はその度に、先生の発想の柔 軟さに驚かされるばかりでした。

大橋隆哉先生には4年の卒研生の時から、指導教官としてご指導頂きました。ゼミや首都大でのミー ティングなどを通して未熟な私に優しく天文学について教えてくださいました。

石崎欣尚さんにはパソコンの設定やトラブルなどの際、お世話になりました。また研究に関しても様々な助言を頂きました。

前田良知さんには、実験の方法について多くの助言を頂きました。私が思いつきもしなかった手法を 提案して頂き研究を進めることができたことが多くありました。また、どんな状況におかれても物事を 前向きに考える姿勢にも驚かされました。お子さんができて、大変だと思いますが、これからも前向き な前田さんでいてください。

伊藤昭治さんにはなかなか一緒に実験をする機会はありませんでしたが、実験について助言を頂きました。

井上裕彦さんには、同じHRXRTの研究をした先輩として多くの助言を頂きました。私が研究で行き 詰まって困っている時に、非常に有用な助言をして下さいました。時には針の様な尖った発言に驚かされ ることもありましたが、助けられたことの方が多かったです、これからもそんな井上さんでいて下さい。

岡田俊策さんには、実験の手法やその考察について多くの助言を頂きました。時には、思春期の中学 生のような発言に引いてしまうこともありましたが、研究で疲れた気持ちをリラックスさせることがで きました。これからもそんな若い岡田さんであり続けて下さい。

首都大・都立大の XRT チームの鈴木真樹君、大澤武幸君、林多佳由君、白田渉雪君は実験の多くを手 伝ってくれました。反射鏡製作、上部光学系などこの修論において欠かすことのできないものを作るの に多いに活躍してくれました。また、年末年始にもかかわらず、無理をして X 線測定を手伝ってくれま した。彼らがいなければ、私の修論はなかったといっても過言ではありません。無理をしてまで手伝っ てくれたことに深く感謝しています。来年は鈴木君、大澤君が修論のですが、後輩の御利用は計画的に、 無理をさせないようにしてください。

宇宙研同期の中村良子さんには、実験を手伝ってくれただけでなく、人生について、遊びについてな ど多くのことを話しました。また、初めて見たときから、酒の席での彼女の恐れを知らない言動にはい つも驚かされてばかりでした。来年度からもそのすさまじい勢いで XRT チームを引っ張っていって下 さい。

鈴木健介君は一緒に実験することはありませんでしたが、食事の時などいろいろお話をすることがあ りました。

首都大同期の倉林元くんとは研究や就活などでよく話しました。来年はお互い社会人になります。お 互い規則正しい生活をして、健康的な社会人生活を送りましょう。

都立大先輩の佐藤浩介さんには、天文に関する知識をいろいろ教えて下さいました。お酒の席と普段 とのギャップには本当に驚かされました。来年からも、そんな佐藤さんでいて下さい。 学部時代の同級生で、今では研究室の先輩の星野晶夫さんには、研究室の仲間としてだけでなく、元 同級生として気さくにいろいろ話をしました。これから研究がさらに忙しくなっていくと思いますが、 頑張って下さい。

首都大後輩の床井和世さんにはなかなか接する機会がありませんでしたが、首都大に行った時には研究 室でよく料理してましたね。これからも研究室のみんなのために安全でおいしい料理を提供して下さい。 三鷹光器株式会社の長谷部さん、三浦さん、株式会社オオイシの大石さんには望遠鏡の部品や治具の 製作、アライメントプレートの製作、そしてその形状評価などでお世話になりました。おかげさまで素 晴しい研究成果をあげることができました。本当にありがとうございます。

私はこのXRT チームでの3年間に学んだこと糧にして、これからも頑張っていきたいと思います。 最後に経済面で、そして精神面で支えてくれた両親と妹に感謝します。

関連図書

- [1] Korsch, D. *Reflective Optics*. Academic Press, 1991.
- [2] von H.Wolter. Spieelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optikenfür Röntgenstrahlen. *Annalen der Physik*, Vol. 10, pp. 94-114, 1952.
- [3] Church, E. L. & Takacs, P. Z. Statistical and signal processing concepts in surface metrology. SPIE,Vol.645,p.107,1986.
- [4] Kunieda, H., Hayakawa et al. Roughness mesurement of x-ray mirror surfaces. Japanese Journal of Applied Physics, Part 1 (ISSN 0021-4922), vol. 25, Sept. 1986, p. 1292-1299., 25, 1292.
- [5] Sinha, S. K. et al. X-ray and neutron scattering from rough surfaces, 1988, prb, 38, 2297.
- [6] 波岡武,山下広順.「X線結像光学」. 培風館, 1999.
- [7] S.P.Timoshenko. 「板とシェルの理論(上・下)」. 丸善, 1973.
- [8] 日高康弘.「X線望遠鏡の結像性能の評価とその高性能化への展望」.修士論文,名古屋大学,2000.
- [9] 今村晃介.「ASTRO-E 衛星搭載用 X 線望遠鏡の地上較性試験と応答関数の構築」. 修士論文, 神戸 大学, 2000.
- [10] 伊藤啓.「X線望遠鏡結像性能向上の研究」.修士論文,東京工業大学,2002.
- [11] 早川彰.「高角度分解能多重薄板型 X 線望遠鏡の開発」.修士論文,東京都立大学,2003.
- [12] 井上智暁. 「高角分解能をめざした多重薄板型 X 線望遠鏡の開発と性能評価」. 修士論文,東京都立 大学, 2004.
- [13] 井上裕彦.「高精度アラインメントによる X 線望遠鏡の高解像度化の研究」. 修士論文,東京工業大 学, 2005.
- [14] 大熊哲.「高角度分解能化を目指した多重薄板型 X 線望遠鏡の設計とその性能評価」. 修士論文,東 京都立大学, 2006.